



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

GUSTAVO LUIS GONÇALVES SALAME

**PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE COMPÓSITOS DE MATRIZ  
POLIÉSTER COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE BURITI (*MAURITIA FLEXUOSA*)**

BELÉM

2026

GUSTAVO LUIS GONÇALVES SALAME

**PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE COMPÓSITOS DE MATRIZ  
POLIÉSTER COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE BURITI (*MAURITIA FLEXUOSA*)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química, do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador(a): Prof. Dr. Emerson Cardoso Rodrigues  
Orientador(a): Eng<sup>a</sup>. de Materiais Jennifer Ferreira  
Fernandes

BELÉM

2026

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

S159p Salame, Gustavo Luis Gonçalves.  
Propriedades físicas e mecânicas de compósitos de matriz  
poliéster com adição de fibras de buriti (*Mauritia Flexuosa*) /  
Gustavo Luis Gonçalves Salame. — 2026.  
76 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Emerson Cardoso Rodrigues  
Coorientador(a): Prof<sup>a</sup>. Jennifer Ferreira Fernandes  
Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Química, Belém,  
2026.

1. Compósitos poliméricos. 2. *Mauritia flexuosa*. 3.  
Valorização de fibras naturais. I. Título.

CDD 620

---

GUSTAVO LUIS GONÇALVES SALAME


**PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE COMPÓSITOS DE MATRIZ  
POLIÉSTER COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE BURITI (*MAURITIA FLEXUOSA*)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química, do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Data de aprovação: 29/01/2026

Conceito: EXCELENTE


**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 **EMERSON CARDOSO RODRIGUES**  
Data: 05/02/2026 14:53:50-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Orientador(a)


Prof. Dr. Emerson Cardoso Rodrigues – UFPA

Documento assinado digitalmente  
 **JENNIFER FERREIRA FERNANDES**  
Data: 05/02/2026 14:16:00-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Orientador(a)


Eng<sup>a</sup>. de materiais Jennifer Ferreira Fernandes

Documento assinado digitalmente  
 **PERICLES CRISIRON PONTES**  
Data: 06/02/2026 10:34:34-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Examinador(a) interno

Prof. Dr. Péricles Crisiron Pontes - UFPA

Documento assinado digitalmente  
 **DEIBSON SILVA DA COSTA**  
Data: 06/02/2026 13:32:04-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Examinador(a) externo

Prof. Dr. Deibson Silva da Costa - UFPA

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Lauriete Gonçalves, por todo o apoio, dedicação e incentivo ao longo de minha trajetória acadêmica, mesmo diante das inúmeras dificuldades, sendo fonte constante de inspiração.

Agradeço à minha tia Lucinete Gonçalves, que sempre exerceu um papel fundamental em minha vida, atuando como uma segunda mãe e sendo igualmente uma grande inspiração.

Aos professores Deibson Costa e Emerson Rodrigues, agradeço pela oportunidade de integrar o grupo de pesquisa, pela confiança em meu potencial e por toda a orientação e apoio concedidos ao longo deste percurso.

À orientadora Jennifer Ferreira, expressei minha gratidão pela paciência, exigência acadêmica e, sobretudo, pelo suporte fundamental durante o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso.

Aos membros do grupo GPMMAC, agradeço pelas contribuições técnicas, conselhos, ensinamentos e trocas de experiências que enriqueceram minha formação acadêmica e pessoal.

Agradeço à Universidade Federal do Pará (UFPA) e ao Laboratório de Engenharia Química (LEQ) pelas oportunidades e condições oferecidas para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos, meu agradecimento por serem um importante ponto de apoio em meio às adversidades da vida acadêmica e pessoal, contribuindo de forma significativa para minha perseverança. Muito obrigado aos que mantem a coragem de gostar de mim, apesar de mim.

Por fim, agradeço ao pequeno Gustavo Luis dos Santos Gonçalves, por nunca ter desistido e por manter a resiliência necessária para chegar até este momento.

## RESUMO

O Buriti (*Mauritia flexuosa*) é uma espécie de relevância socioeconômica na Amazônia, sendo fonte de renda e alimento, porém o descarte dos pecíolos gera um volume significativo de resíduos agroflorestais. Dessa forma, o trabalho objetivou caracterizar as fibras do pecíolo do buriti e incorporá-las em matriz polimérica para posterior realização de ensaios físicos, mecânicos e análise fractográfica dos compósitos. As fibras foram extraídas manualmente e submetidas à determinação da massa específica pelo método do picnômetro e caracterização morfológica por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A fabricação iniciou-se com uma matriz de resina poliéster ortoftálica, iniciador de cura Butanox M-50 a 1% (m/m) e a fibra de buriti em frações mássicas de 1%, 3%, 5% e 7%, além do controle (0%), a partir do método de fabricação hand lay-up em molde de silicone com aplicação de compressão de aproximadamente 24 N. Os compósitos produzidos foram submetidos aos ensaios físicos de Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA) e Massa Específica Aparente (MEA) que seguiram as normas ASTM D570, ASTM D2734 e ASTM D792, respectivamente. Os ensaios mecânicos de tração e flexão foram realizados em conformidade com as normas ASTM D638 e ASTM D790, respectivamente. Também foram realizadas por MEV as análises fractográficas dos compósitos de tração e flexão. A massa específica da fibra foi de 0,489 g/cm<sup>3</sup>, valor compatível com materiais porosos, e diante da fibra analisada, notou-se uma morfologia rugosa com presença de lúmens e estrias. Nos ensaios físicos dos compósitos houve um aumento da AA e PA após inserção das fibras devido à sua natureza hidrofílica, contudo, observou-se redução na MEA, conferindo maior leveza ao material. Nos ensaios mecânicos de tração, as fibras atuaram predominantemente como carga de enchimento na matriz, apresentando uma diminuição de 18,73% no Limite de Resistência a Tração para o compósito de 1% em fibras, e de 23,53% para o compósito de 3%. Nos ensaios de flexão o comportamento é semelhante, com os compósitos de 1% e 3% apresentando uma diminuição de 44,62% e 51,72%, respectivamente. Porém, a fração de 7% em ambos os casos obteve recuperação de desempenho, atingindo resistência à tração e flexão estatisticamente semelhante (0,597 e 0,730, respectivamente) à matriz plena, pelos testes de comparações de Tukey e Kruskal-Wallis. Na análise fractográfica, observou-se a presença de vazios e falhas de adesão na interface fibra-matriz. Assim, o desempenho da fibra de buriti possibilita realizar aplicações como carga funcional em componentes que demandam menor peso e sustentabilidade.

Palavras-chave: Compósitos poliméricos; *Mauritia flexuosa*; Valorização de fibras naturais.

## ABSTRACT

Buriti (*Mauritia flexuosa*) is a species of socioeconomic relevance in the Amazon, serving as a source of income and food; however, the disposal of its petioles generates a significant volume of agroforestry waste. Thus, this work aimed to characterize the buriti petiole fibers and incorporate them into a polymeric matrix for subsequent physical and mechanical testing, and fractographic analysis of the composites. The fibers were manually extracted and subjected to specific mass determination using the pycnometer method and morphological characterization via Scanning Electron Microscopy (SEM). Fabrication began with an orthophthalic polyester resin matrix, Butanox M-50 curing initiator at 1% (m/m), and buriti fiber in mass fractions of 1%, 3%, 5%, and 7%, in addition to a control (0%), using the hand lay-up method in a silicone mold with an applied compression of 24.03 N. The produced composites were subjected to physical tests for Water Absorption (WA), Apparent Porosity (AP), and Apparent Density (AD), following ASTM D570, ASTM D2734, and ASTM D792 standards, respectively. Tensile and flexural mechanical tests were performed in accordance with ASTM D638 and ASTM D790 standards, respectively. Fractographic analyses of the tensile and flexural composites were also performed via SEM. The specific mass of the fiber was  $0.489 \text{ g/cm}^3$ , a value compatible with porous materials, and the analyzed fiber showed a rough morphology with the presence of lumens and striations. In the physical tests of the composites, an increase in WA and AP was observed after fiber insertion due to their hydrophilic nature; however, a reduction in AD was observed, imparting greater lightness to the material. In the tensile and flexural mechanical tests, the fibers acted predominantly as filler in the matrix, presenting a decrease in strength at initial contents; however, the 7% fraction achieved performance recovery, reaching tensile strength statistically similar to the neat matrix. Fractographic analysis revealed the presence of voids and adhesion failures at the fiber-matrix interface. Thus, the performance of the buriti fiber enables applications as a functional filler in components requiring lower weight and sustainable appeal.

**Keywords:** Polymeric composites; *Mauritia flexuosa*; Waste valorization.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> – Classificação dos materiais compósitos.....	18
<b>Figura 2</b> - Representação dos diferentes tipos de fases dispersas. ....	22
<b>Figura 3</b> – Formas de atuação das fibras na fase reforço .....	23
<b>Figura 4</b> – Palmeira do Buriti .....	28
<b>Figura 5</b> - Representação do pecíolo de um buritizeiro.....	30
<b>Figura 6</b> - Fluxograma do processo de fabricação dos compósitos.....	33
<b>Figura 7</b> – Resina e Ativador (a – b) .....	34
<b>Figura 8</b> – Pecíolos do buriti .....	35
<b>Figura 9</b> – Fibras de buriti .....	36
<b>Figura 10</b> – Microscópio Eletrônico de Varredura.....	37
<b>Figura 11</b> - Balança determinadora de umidade.....	38
<b>Figura 12</b> - Fluxograma de fabricação dos compósitos.....	39
<b>Figura 13</b> - Medidas do corpo de prova para ensaios físicos .....	40
<b>Figura 14</b> - Corpos de prova utilizados .....	41
<b>Figura 15</b> - Ilustração do aparato para medir a massa imersa .....	42
<b>Figura 16</b> - Medidas do corpo de prova para tração.....	43
<b>Figura 17</b> - Máquina da marca KRATOS.....	44
<b>Figura 18</b> - Medidas do corpo de prova para flexão.....	45
<b>Figura 19</b> - Máquina modelo iM50 .....	46
<b>Figura 20</b> - Micrografia da fibra de buriti (a-b).....	50
<b>Figura 21</b> - Histograma e teste de normalidade para o limite de resistência a tração .....	55
<b>Figura 22</b> - Comparação entre o Limite de Resistência e Porosidade Aparente .....	56
<b>Figura 23</b> - Fraturas do compósito com 1% de fibras de buriti.....	58
<b>Figura 24</b> - Fraturas do compósito com 3% de fibras de buriti.....	59
<b>Figura 25</b> - Fratura do compósito com 5% de fibras de buriti.....	60
<b>Figura 26</b> - Fratura do compósito com 7% de fibras.....	60
<b>Figura 27</b> - Resistência a flexão .....	63
<b>Figura 28</b> - Histograma e teste de normalidade para a resistência a flexão .....	64

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Massa específica da fibra e comparações.....	48
<b>Tabela 2</b> - Ensaio Físicos (AA, PA e MEA).....	51
<b>Tabela 3</b> - Dados obtidos no ensaio de tração .....	53
<b>Tabela 4</b> - Teste de Tukey (HSD) para comparação de médias do limite de resistência .....	56
<b>Tabela 5</b> - Limites de resistência a Tração em comparações com outros trabalhos.....	57
<b>Tabela 6</b> - Resultados do ensaio de flexão .....	61
<b>Tabela 7</b> - Valores de p para o teste de Kruskal - Wallis na resistência a flexão.....	65
<b>Tabela 8</b> - Limite de resistência a flexão em comparação com outras literaturas .....	65

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AA	Absorção de Água
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATL	Automated Tape Laying
BPA	Boas Práticas Agrícolas
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CPs	Corpos de Prova
DSC	Differential Scanning Calorimetry
F	Carga aplicada
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
GPMCOMP	Grupo de Pesquisa em Materiais Compósitos
HSD	Honest Significant Difference
ILO	International Labour Organization
kV	Quilovolt
LABA	Laboratório de Biossoluções e Bioplásticos da Amazônia
LABCAT	Laboratório de Catálise e Biocatálise
LABEM	Laboratório de Engenharia Mecânica
LabMEV	Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura
LACMAT	Laboratório de Caracterização de Materiais
LEQ	Laboratório de Engenharia Química
LRT	Limite de Resistência à Tração
MEA	Massa Específica Aparente
MEK-P	Peróxido de Metil-Etil-Cetona
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MI	Massa Imersa
m/m	Massa por massa
MPa	Megapascal
MS	Massa Seca
MU	Massa Úmida
N	Newton
PA	Porosidade Aparente
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
RTM	Resin Transfer Molding

SE	Elétrons Secundários
SEMA	Secretaria de Estado de Meio Ambiente
TGA	Thermogravimetric Analysis
TRT	Tensão de Resistência à Tração
UFPA	Universidade Federal do Pará
W	Estatística do teste de Shapiro-Wilk
$\alpha$	Nível de significância (Alfa)
$\rho_{H_2O}$	Massa específica da água
$\sigma$	Tensão (Tensão de flexão)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Justificativa.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2 Objetivo geral.....</b>	<b>14</b>
1.2.1 Objetivos específicos.....	15
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Materiais compósitos.....</b>	<b>16</b>
2.1.1 Fase matriz.....	18
2.1.1.1 Matrizes poliméricas.....	19
2.1.1.1.1 Resina Poliéster.....	20
2.1.2 Fase reforço.....	21
2.1.2.1 Tipos de reforço.....	23
<b>2.2 Compósitos Poliméricos.....</b>	<b>24</b>
2.2.1 Compósitos reforçados com fibras.....	26
<b>2.3 Buriti (Mauritia Flexuosa).....</b>	<b>28</b>
2.3.1 Pecíolo do Buriti.....	30
2.3.2 Propriedades da fibra do buriti.....	31
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>33</b>
<b>3.1 Materiais.....</b>	<b>34</b>
3.1.1 Matriz.....	34
3.1.2 Fibras do Buriti.....	34
<b>3.2 Métodos.....</b>	<b>35</b>
3.2.1 Extração das fibras.....	35
3.2.1.1 Massa específica das fibras.....	36
3.2.1.2 Morfologia das fibras.....	37
3.2.1.3 Teor de umidade da fibra de buriti.....	37
3.2.2 Fabricação dos compósitos.....	38
3.2.3 Ensaio físicos dos compósitos.....	40
3.2.4 Ensaio mecânicos.....	42
3.2.4.1 Ensaio de tração.....	42
3.2.4.2 Análise fractográfica.....	44
3.2.4.3 Ensaio de flexão.....	45
<b>3.3 Análise estatística.....</b>	<b>47</b>

<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>48</b>
<b>4.1 Massa específica da fibra.....</b>	<b>48</b>
<b>4.2 Morfologia da fibra.....</b>	<b>49</b>
4.2.1 Teor de umidade das fibras de buriti .....	51
<b>4.3 Ensaios físicos dos compósitos .....</b>	<b>51</b>
<b>4.4 Ensaios mecânicos .....</b>	<b>53</b>
4.4.1 Ensaio de tração .....	53
4.4.1.1 Análise fractográfica .....	57
4.4.2 Ensaio de flexão .....	61
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>66</b>
<b>5.1 Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>66</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico, impulsionado pelo aumento do consumo global, tem intensificado a exploração de recursos naturais, impondo desafios à disponibilidade de matérias-primas e à sustentabilidade (Faruk *et al.*, 2012; Oberle *et al.*, 2019). Em resposta, cresce a adoção de estratégias voltadas à otimização e ao aproveitamento integral de recursos, estimulando inovações que conciliam sustentabilidade, geração de empregos e oportunidades econômicas (Satyanarayana *et al.*, 2007; Vinod *et al.*, 2020; ILO/Circle Economy *et al.*, 2024).

Nesse contexto, a engenharia tem buscado desenvolver produtos e processos inovadores, com propriedades específicas, sustentáveis e baseados em recursos renováveis. Entre essas soluções, destacam-se os materiais compósitos, definidos como sistemas multifásicos cujas propriedades resultam da interação sinérgica entre fases distintas, separadas por uma interface bem definida. Assim, a combinação planejada de dois ou mais componentes permite obter propriedades otimizadas. As propriedades desses materiais como resistência, módulo e flexão dependem das características da matriz, do tipo e geometria do reforço, de sua fração volumétrica e do método de processamento (Callister Jr.; Rethwisch, 2020; Pinto, 2018).

A importância dos compósitos reflete-se em seu mercado em expansão: segundo a Mordor Intelligence (2024), o setor deve crescer a uma taxa anual composta (CAGR) de 4,11% entre 2024 e 2029. Os materiais compósitos podem ser fabricados utilizando reforços de materiais particulados grandes, pequenos ou com fibras sintéticas e naturais, sejam longas ou curtas. Alinhado a isso, a pesquisa em materiais compósitos tem explorado bastante o uso de fibras naturais como reforço. A atratividade dessas fibras reside em suas características vantajosas, notadamente o baixo custo e o fato de serem provenientes de fontes renováveis, em contraste com as alternativas sintéticas. Estudos mais recentes corroboram essas vantagens e destacam avanços em tratamentos de superfície e em compatibilizantes, visando melhorar a adesão matriz-fibra e reduzir a higroscopicidade das fibras naturais (Vinod *et al.*, 2020; Ishizaki *et al.*, 2006).

As fibras vegetais, também conhecidas como fibras lignocelulósicas, são constituídas por células que garantem a sustentação estrutural dos tecidos vegetais, conferindo-lhes resistência e flexibilidade. Sua composição química baseia-se em celulose, hemicelulose e lignina (Ballesteros *et al.*, 2019; Diniz *et al.*, 2021). A celulose é o componente estrutural dominante nas fibras vegetais e proporciona rigidez e resistência mecânica. A lignina age

como um aglomerante na matriz da parede celular, preenchendo os espaços entre microfibrilas e aumentando a rigidez global, além de atuar como uma barreira natural frente à degradação microbiana. A hemicelulose, por sua vez, conecta a celulose e a lignina, contribuindo para a coesão estrutural além da proteção química e mecânica da fibra. (Godoy, 2010; Eleutério *et al.*, 2025; Jiju *et al.*, 2025)

Nos compósitos, as fibras funcionam como fase de reforço, suportando a carga aplicada, enquanto a matriz as envolve, protege e transfere tensão. O desempenho do material depende da orientação, comprimento e adesão interfacial das fibras. Fibras longas e contínuas oferecem melhor transferência de carga, embora fibras curtas também possam ser eficazes, desde que excedam o comprimento crítico (Callister Jr.; Rethwisch, 2020).

A palmeira Buriti (*Mauritia flexuosa*) é uma espécie de grande porte encontrada na região Norte do Brasil, podendo alcançar até 40 metros de altura, com estipes (caules) de 13 a 55 cm de diâmetro na base. A planta é conhecida pela grande versatilidade de aplicações, com possibilidade de aproveitamento integral de todas as suas partes (Ribeiro, 2015). Dentre estas, o pecíolo destaca-se pelo potencial de uso na construção civil, como em paredes e forros, além da fabricação de móveis. Seus componentes também possuem aplicações distintas: a epiderme (casca) é empregada na confecção de chapéus e leques, enquanto o parênquima (material interno) é utilizado na produção de brinquedos e artesanatos. Notavelmente, a extração do pecíolo é uma prática sustentável, pois sua retirada não causa danos ao estipe da palmeira (Rocha, 2002; Siqueira *et al.*, 2021).

O potencial do pecíolo da palmeira buriti como fonte de reforço para materiais compósitos tem sido, de fato, investigado na literatura científica. Estudos de caracterização indicam que as fibras extraídas desta fonte possuem uma combinação de propriedades desejáveis como baixa massa específica, boa estabilidade térmica e morfologia superficial rugosa que favorece a adesão à matriz polimérica e que valida seu uso como agente de reforço em compósitos de baixo custo (Santos *et al.*, 2013; Demosthenes *et al.*, 2020).

Portanto, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de compósitos em matriz polimérica com diferentes frações mássicas de fibra (0%, 1%, 3%, 5% e 7%). E posteriormente avaliar suas propriedades físicas e desempenho mecânico sob tração e flexão.

## **1.1 Justificativa**

O cenário industrial contemporâneo enfrenta o desafio de conciliar o desenvolvimento tecnológico com a sustentabilidade ambiental. A crescente demanda por materiais de alto desempenho tem, historicamente, se apoiado em recursos de origem fóssil, como polímeros

sintéticos e fibras de vidro ou carbono, cujo ciclo de vida apresenta elevado custo energético e gera resíduos de difícil degradação (Jambeck *et al.*, 2023). Em resposta a essa problemática, a comunidade científica e o setor industrial têm direcionado esforços para a pesquisa de materiais ecologicamente corretos. Nesse contexto, os compósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas emergem como uma alternativa estratégica, devido a vantagens como a baixa densidade, o baixo custo e a renovabilidade (Sanjay *et al.*, 2018; Prasad *et al.*, 2024).

A Amazônia, com sua vasta biodiversidade, representa uma fonte proeminente de recursos para o desenvolvimento desses novos materiais. Dentre as espécies da flora regional, destaca-se a palmeira Buriti (*Mauritia flexuosa*), um recurso de grande importância socioeconômica, principalmente pelo aproveitamento de seus frutos. No entanto, uma quantidade significativa de subprodutos, como o pecíolo (caule da folha), é frequentemente descartada ou subutilizada (Leão; Leite, 2020). Estudos de caracterização demonstram que as fibras extraídas deste pecíolo possuem propriedades atrativas para aplicações em engenharia, como uma massa específica relativamente baixa e um desempenho mecânico promissor, atribuído ao seu alto teor de celulose, que estudos mais recentes indicam um valor em torno de 58%, associando-se ainda a boa estabilidade térmica e morfologia que favorece a adesão fibra-matriz, características que reforçam seu potencial como material de reforço em compósitos. (da Silveira *et al.*, 2024; Santos *et al.*, 2013).

A incorporação da fibra de buriti como reforço em matrizes poliméricas constitui, portanto, uma rota promissora para a valorização deste resíduo agroindustrial. Estudos experimentais recentes indicam que a forma do reforço e o teor de fibra influenciam de modo significativo as propriedades mecânicas de compósitos de matriz poliéster, o que evidencia a necessidade de investigações sistemáticas sobre a influência da concentração desta fibra nas propriedades finais (Freires *et al.*, 2024).

Dessa forma, este trabalho se justifica pela dupla necessidade de preencher essa lacuna científica e, ao mesmo tempo, fomentar a bioeconomia amazônica. A geração de dados técnicos para a aplicação deste compósito pode viabilizar seu uso em diversos setores, abrindo perspectivas para a criação de novas cadeias produtivas de valor agregado para as comunidades extrativistas locais.

## **1.2 Objetivo geral**

O presente trabalho propôs desenvolver compósitos de matriz polimérica com diferentes frações mássicas (0%, 1%, 3%, 5% e 7%), a fim de avaliar sua influência nas propriedades físicas e propriedades mecânicas de tração e flexão. Adicionalmente,

realizou-se a análise fractográfica para correlacionar o desempenho mecânico com os mecanismos de fratura e a qualidade da interface fibra-matriz.

#### 1.2.1 Objetivos específicos

- Avaliar a massa específica da fibra de buriti *in natura*;
- Analisar a morfologia da fibra de buriti por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da superfície da fibra.
  - Avaliar as propriedades físicas dos compósitos por meio de ensaios de massa específica aparente (MEA), porosidade aparente (PA) e Absorção de água (AA);
  - Determinar as propriedades mecânicas de tração e flexão dos diferentes compósitos;
  - Avaliar a fractografia das superfícies de fratura para investigar a interface fibra-matriz e elucidar os mecanismos de falha;

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Materiais compósitos

Embora o estudo formal dos compósitos avançados seja associado ao século XX, práticas de combinação de materiais com vistas a obter propriedades superiores remontam à antiguidade. Civilizações como a egípcia e mesopotâmica já utilizavam tijolos de barro reforçados com palha ou fibras vegetais para aumentar sua resistência mecânica, enquanto impérios asiáticos fabricavam arcos compostos por camadas de madeira, tendões e chifres para melhorar elasticidade e potência (Marom, 2021). Na era moderna, a virada se deu com o desenvolvimento de polímeros sintéticos. Em 1907, o químico Leo Hendrik Baekeland inventou a baquelite, considerado um dos primeiros plásticos totalmente sintéticos, e nas décadas seguintes surgiram reforços como a fibra de vidro, consolidando o uso dos compósitos poliméricos para aplicações estruturais (Britannica; Marom, 2021).

O grande diferencial dos materiais compósitos reside em seu desempenho, que é frequentemente avaliado por meio de suas propriedades específicas. Uma propriedade específica é definida como a razão entre uma propriedade mecânica (como a resistência ou a rigidez) e a massa específica do material. Os compósitos se destacam por apresentarem elevada resistência específica e elevado módulo de elasticidade específico, o que significa que são capazes de oferecer um desempenho mecânico comparável ou superior ao de muitos metais, porém com uma fração de seu peso. Além disso, são projetados para oferecer excelente resistência à fadiga, à corrosão e estabilidade dimensional, características que os tornam ideais para aplicações de alta performance (Callister Jr.; Rethwisch, 2020).

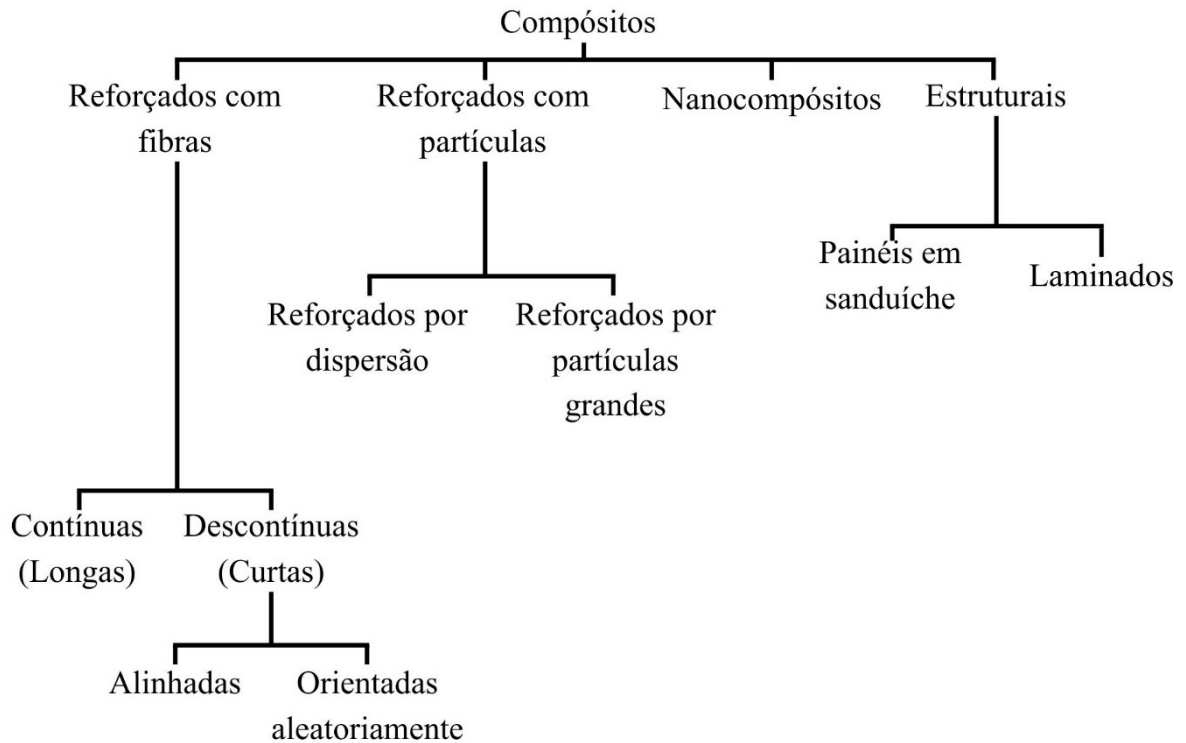
Essa combinação única de propriedades justifica a vasta gama de aplicações dos compósitos. Na indústria aeroespacial por exemplo, a alta razão resistência/peso é crucial para a fabricação de componentes de aeronaves, como fuselagens e asas, resultando em economia de combustível e maior capacidade de carga. No setor automotivo, são utilizados para produzir painéis de carroceria mais leves e chassis de carros de alto desempenho. A resistência à corrosão os torna os materiais de escolha para cascos de embarcações na indústria naval, enquanto a leveza e a rigidez são exploradas em equipamentos esportivos, como bicicletas, raquetes de tênis e pranchas de surfe (Saba; Jawaid; Sultan, 2017).

Para alcançar esse desempenho, os compósitos dependem da interação sinérgica entre suas duas fases principais: a matriz e o reforço. A matriz é a fase contínua que envolve o reforço, conferindo forma, coesão e acabamento superficial ao material. Suas funções primordiais são proteger o reforço de danos e do ambiente externo e, mais importante,

transferir eficientemente os esforços mecânicos para a fase de reforço. As matrizes podem ser classificadas em três grandes grupos: poliméricas, metálicas e cerâmicas. As matrizes poliméricas, por sua facilidade de processamento, baixo custo e leveza, são as mais utilizadas na engenharia, sendo a base para a grande maioria dos compósitos estruturais (Neto; Pardini, 2016; Oladele *et al.*, 2020).

O reforço, por sua vez, é a fase que efetivamente confere ao compósito suas propriedades mecânicas distintas, como alta resistência e rigidez. É o principal elemento de sustentação de carga. A forma como o reforço é apresentado no compósito é fundamental para o seu desempenho final, sendo geralmente classificado em duas categorias: particulado e fibroso. Os reforços fibrosos são os mais eficientes para aplicações estruturais, e podem ser utilizados na forma de fibras curtas e distribuídas aleatoriamente (resultando em propriedades mais isotrópicas) ou na forma de fibras longas e alinhadas ou tecidas em mantas (resultando em propriedades anisotrópicas, com altíssimo desempenho na direção das fibras) (Callister Jr.; Rethwisch, 2020).

Em síntese, a versatilidade dos compósitos reside na capacidade de projetar um material "sob medida", selecionando e combinando diferentes tipos de matrizes e reforços para atender a requisitos específicos de uma aplicação. Os usos atuais continuam a se expandir para a construção civil, energia eólica e setor de óleo e gás. A principal tendência para os usos futuros, alinhada à crescente demanda por sustentabilidade, é a intensificação da pesquisa e aplicação dos biocompósitos. Estes materiais utilizam fibras de fontes renováveis, como o buriti, e buscam o desenvolvimento de matrizes também de base biológica ou biodegradáveis, representando a próxima fronteira na evolução dos materiais compósitos (Faruk *et al.*, 2012; Kamarudin *et al.*, 2022). Na Figura 1 está simplificado um esquema de classificação de materiais compósitos e seus tipos de reforço.

**Figura 1** – Classificação dos materiais compósitos

**Fonte:** Adaptado de Callister e Rethwisch, 2020

### 2.1.1 Fase matriz

A fase matriz nos materiais compósitos atua como o componente contínuo que envolve o reforço, conferindo coesão, estabilidade dimensional e proteção contra agentes externos. Além de suportar esforços de tração, compressão e cisalhamento, a matriz desempenha um papel determinante na transmissão eficiente de tensões para a fase dispersa, garantindo que as fibras ou partículas reforçantes contribuam de maneira otimizada para o desempenho mecânico do compósito (Merlini, 2021). Sharma (2020) destaca que a compatibilidade química e mecânica entre matriz e reforço é crucial para prevenir delaminações e microtrincas, sendo a interface o ponto crítico que controla a resistência à fadiga e ao impacto.

Os compósitos de matriz metálica são desenvolvidos para aplicações que exigem alto desempenho mecânico em temperaturas elevadas, combinando a ductilidade e tenacidade de metais como alumínio, magnésio ou titânio com a elevada rigidez de reforços cerâmicos, como o carbetto de silício. Já os compósitos de matriz cerâmica são projetados para ambientes extremamente severos, apresentando excelente estabilidade térmica, resistência ao desgaste e à oxidação. Contudo, sua aplicação industrial é limitada devido à alta fragilidade inerente às cerâmicas, o que impõe desafios em termos de processamento e tenacidade (Callister Jr.;

Rethwisch, 2020; Rezende; Costa, 2011).

Por fim, os compósitos de matriz polimérica representam a classe mais difundida de compósitos, amplamente empregada devido ao seu baixo custo, leveza, facilidade de conformação e boa moldabilidade. Esses materiais utilizam polímeros como fase contínua, capazes de distribuir tensões e proteger o reforço contra o ambiente externo. Sua versatilidade permite a incorporação de diferentes tipos de fibras e cargas, resultando em propriedades mecânicas e térmicas ajustáveis conforme a aplicação. A elevada razão resistência/peso, associada à simplicidade de processamento em temperaturas relativamente baixas, consolidou os compósitos de matriz polimérica como a principal escolha para setores como o automotivo, aeronáutico e de construção civil (Callister Jr.; Rethwisch, 2020).

#### 2.1.1.1 Matrizes poliméricas

As matrizes poliméricas constituem a classe mais difundida e versátil de matrizes para materiais compósitos, principalmente devido à sua baixa massa específica, facilidade de processamento e custo relativamente baixo. As matrizes poliméricas são classificadas em dois grandes grupos com base em seu comportamento frente ao aquecimento: termoplásticas e termorrígidas (Gomes, 2020; Polleto, 2017).

Os polímeros termoplásticos são caracterizados por cadeias moleculares lineares ou ramificadas, unidas por forças intermoleculares secundárias, permitindo que o material amoleça quando aquecido e solidifique ao ser resfriado de forma reversível. Essa característica possibilita o reprocessamento e reciclagem, representando uma vantagem sob a perspectiva da sustentabilidade. Exemplos comuns incluem o polipropileno e a poliamida. Além disso, os termoplásticos estão ganhando destaque pela maior facilidade de reprocessamento em comparação com poliésteres termorrígidos, embora ainda necessitem de melhorias para suportar temperaturas elevadas e fluência em aplicações de alto desempenho. Contudo, sua aplicação em compósitos estruturais de alto desempenho pode ser limitada pela menor resistência a temperaturas elevadas e à fluência quando comparados aos termorrígidos (Oladele *et al.*, 2020; Corrêa *et al.*, 2003).

As matrizes termorrígidas, por outro lado, são polímeros que, uma vez curados por meio de calor ou reação química, formam uma estrutura tridimensional de ligações cruzadas de forma permanente e irreversível. Essa estrutura em rede confere aos materiais excelentes propriedades, como elevada rigidez, alta estabilidade dimensional e resistência a altas temperaturas e ao ataque químico, tornando-os a escolha preferencial para aplicações estruturais de alto desempenho. Dentre as resinas termorrígidas mais utilizadas, destacam-se

as resinas poliéster insaturada, amplamente empregada devido à sua versatilidade e baixo custo, e as resinas epóxi, que possuem atributos excepcionais como excelente desempenho mecânico, boa resistência à fadiga, alta estabilidade térmica, baixo encolhimento durante a cura e adesão superior às fibras de reforço (Polleto, 2017; Silva; Koehler amico, 2019; Ratna, 2009).

#### 2.1.1.1.1 Resina Poliéster

As resinas de poliéster insaturado representam uma das famílias mais importantes e utilizadas de resinas termorrígidas na indústria de materiais compósitos, principalmente devido à sua grande versatilidade, facilidade de processamento e baixo custo. O processo de cura dessas resinas ocorre por meio de uma reação de polimerização via radicais livres, geralmente iniciada por um catalisador e um acelerador, na qual as cadeias do poliéster se entrelaçam com um monômero reativo, formando uma estrutura de rede tridimensional rígida, infusível e termorrígida. Estudos recentes ressaltam que parâmetros de cura como a temperatura controlam a cinética de polimerização e influenciam diretamente as propriedades finais do material (Zapata; Arcila, 2012; Barakat *et al.*, 2024).

Existem diversos tipos de resinas de poliéster insaturado, que se diferenciam pela sua estrutura química e, conseqüentemente, por suas propriedades e aplicações. As resinas ortoftálicas são as de uso mais geral e econômico, apresentando boas propriedades mecânicas básicas. As resinas isoftálicas, formuladas a partir do ácido isoftálico, oferecem desempenho superior com melhor resistência química, à umidade e ao intemperismo. As resinas tereftálicas, baseadas no ácido tereftálico, proporcionam ainda maior resistência mecânica e química, sendo ideais para aplicações estruturais exigentes como tubulações e tanques industriais (Composites word, 2020).

Outros tipos importantes incluem as resinas DCPD (diclopentadieno), que oferecem excelente resistência ao impacto e tenacidade, sendo amplamente utilizadas na indústria automotiva e naval. As resinas éster vinílicas, embora tecnicamente distintas, são frequentemente agrupadas com as resinas poliéster devido as suas características similares de processamento, destacando-se pela superior resistência química e resistência a corrosão, especialmente em ambientes ácidos e alcalinos agressivos. Cada tipo apresenta características específicas que determinam sua adequação para diferentes aplicações, desde produtos de uso geral até componentes estruturais de alto desempenho (Arquimi, 2020).

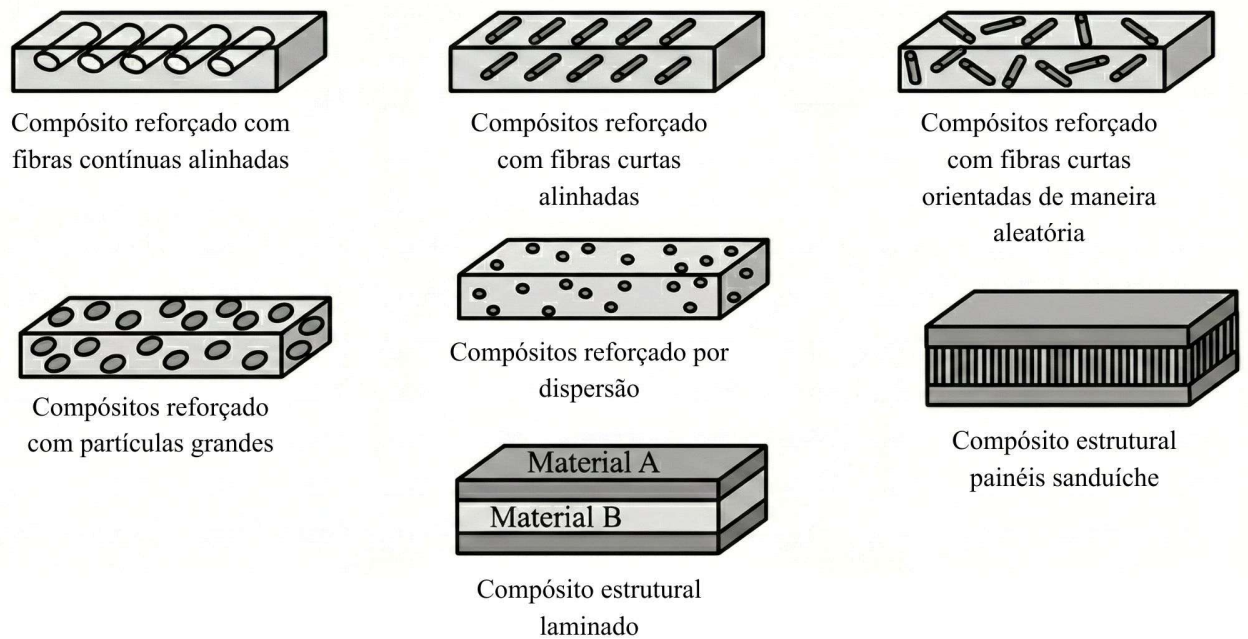
### 2.1.2 Fase reforço

A fase de reforço, também conhecida como fase dispersa, é o elemento fundamental que confere aos materiais compósitos suas propriedades mecânicas superiores, como alta resistência e rigidez, que não seriam alcançadas apenas pela matriz. A principal função do reforço é suportar a maior parte da carga aplicada ao material, enquanto a matriz atua para unir os reforços, protegê-los de danos ambientais e transferir a carga entre eles. Para que o reforço seja eficaz, ele deve possuir uma interface adequada que permita a transferência eficiente de tensões (Callister Jr.; Rethwisch, 2020).

O mecanismo de transferência de carga é um aspecto crucial no desempenho dos compósitos. Quando uma tensão é aplicada ao material, a matriz deve ser capaz de transferir essa carga para o reforço através da interface entre as fases. A eficiência dessa transferência depende diretamente da qualidade da adesão interfacial entre matriz e reforço. Uma interface forte resulta em maior módulo de elasticidade e resistência à tração do compósito, enquanto uma interface fraca pode levar à falha prematura do material. Por isso, estudos recentes buscam melhorar técnicas de modificação de interface, reforçando o aprimoramento da adesão interfacial visando maior resistência e durabilidade nos compósitos. O comprimento crítico das fibras também é um parâmetro importante, pois fibras muito curtas não conseguem desenvolver tensões suficientes para contribuir efetivamente com o reforço (Marinucci, 2006; Liu *et al.*, 2023).

Segundo Phiri *et al.*, 2024, a classificação dos compósitos é frequentemente baseada na geometria da sua fase de reforço. As propriedades finais do material são altamente dependentes de características como a forma, o tamanho, a distribuição e a orientação dos reforços dentro da matriz. De maneira geral, a fase dispersa pode ser classificada em três categorias principais, conforme ilustrado na Figura 2: reforçados com partículas (onde o reforço apresenta dimensões aproximadamente iguais em todas as direções), reforçados com fibras (onde uma dimensão é significativamente maior que as outras) e estruturais (compósitos laminados ou sanduíche, onde camadas de diferentes materiais são combinadas). Todos os 3 tipos de reforço possuem variações e cada tipo oferece vantagens específicas, sendo as fibras contínuas as mais eficazes para aplicações estruturais devido à sua capacidade superior de transferência de carga.

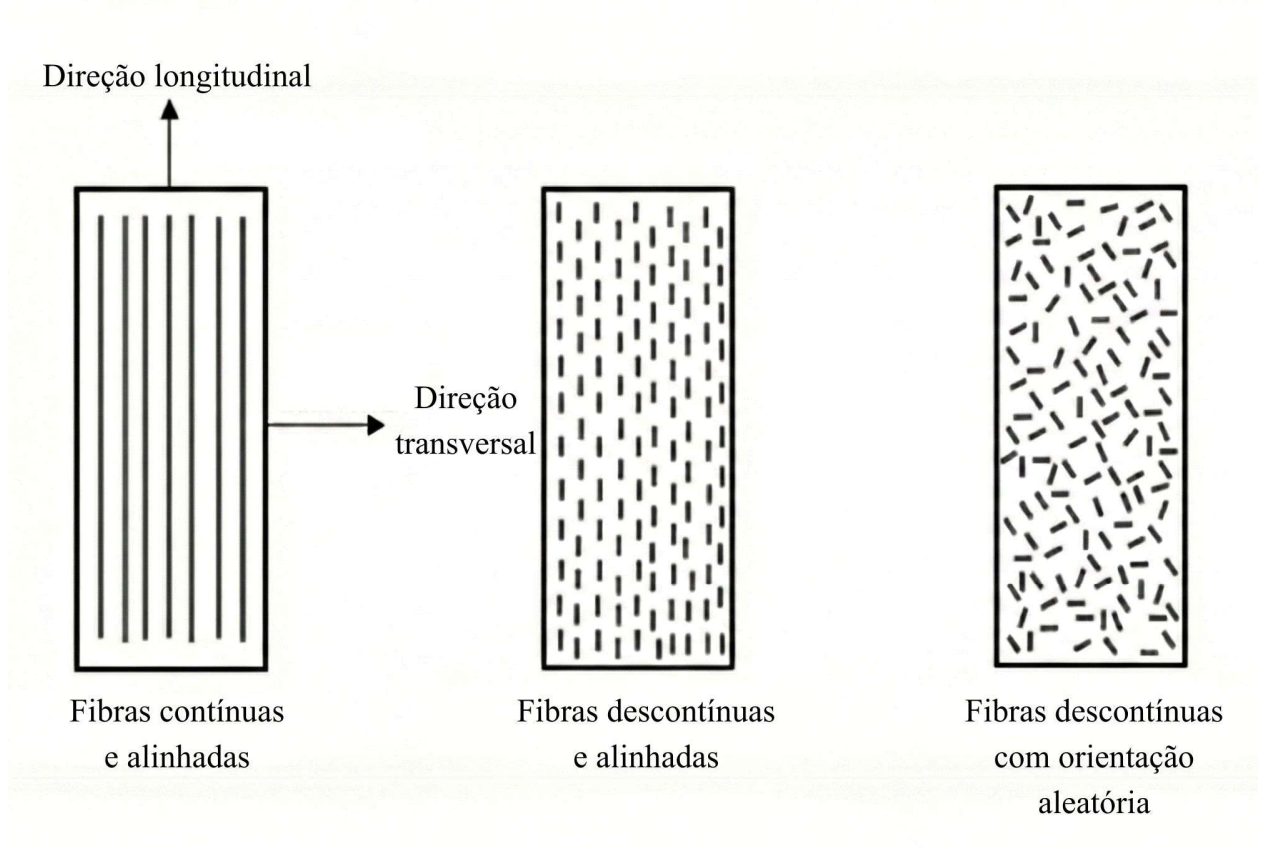
**Figura 2** - Representação dos diferentes tipos de fases dispersas.



**Fonte:** Adaptado de Callister e Rethwisch, 2020

Os tipos de reforço mais comumente utilizados incluem as fibras de vidro, que apresentam excelente relação custo-benefício e boa adesão com matrizes poliméricas; as fibras de carbono, que oferecem as melhores propriedades mecânicas específicas e resistência química; e as fibras de aramida, conhecidas por sua alta tenacidade e resistência ao impacto. Mais recentemente, as fibras naturais têm ganhado destaque como alternativa sustentável, embora apresentem desafios relacionados à compatibilidade com matrizes poliméricas e estabilidade dimensional. A escolha do tipo de reforço deve considerar não apenas as propriedades mecânicas desejadas, mas também fatores como custo, processabilidade e requisitos ambientais da aplicação (Barros *et al.*, 2005; Callister Jr.; Rethwisch, 2020). A Figura 3 a seguir demonstra as formas de atuação das fibras nas propriedades de reforço de um compósito.

**Figura 3** – Formas de atuação das fibras na fase reforço



**Fonte:** Adaptado de Callister e Rethwisch, 2020

#### 2.1.2.1 Tipos de reforço

Os reforços são classificados primariamente com base em sua geometria, o que influencia diretamente o mecanismo de reforço e as propriedades finais do compósito. Esta classificação geométrica determina não apenas a forma como as cargas são transferidas, mas também os métodos de processamento e as aplicações finais dos materiais compósitos (Callister Jr.; Rethwisch, 2020).

O reforço particulado representa uma das formas mais antigas e amplamente utilizadas de reforço em materiais compósitos. Este tipo de reforço consiste na incorporação de partículas discretas em uma matriz contínua, podendo ser classificado em duas subcategorias distintas baseadas no tamanho das partículas e no mecanismo de reforço predominante. Os compósitos reforçados com partículas grandes (tipicamente maiores que  $1\ \mu\text{m}$ ) dependem principalmente da transferência de carga entre as fases para melhorar as propriedades mecânicas. Exemplos clássicos incluem a adição de negro de fumo em borracha para aumentar significativamente a resistência ao rasgo e à abrasão, e a incorporação de partículas de carbonato de cálcio em polímeros para reduzir custos e melhorar a rigidez. Por outro lado,

os compósitos endurecidos por dispersão utilizam partículas extremamente finas (nanopartículas menores que  $0,1 \mu\text{m}$ ) que atuam como obstáculos ao movimento de discordâncias na matriz, resultando em um endurecimento significativo do material. Exemplos importantes incluem nanopartículas de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) para melhorar a dureza e estabilidade dimensional de matrizes poliméricas (Callister Jr.; Rethwisch, 2020).

Os reforços fibrosos constituem a categoria mais eficaz e versátil para o aumento da resistência e rigidez dos compósitos, sendo amplamente utilizados em aplicações estruturais de alto desempenho. Diferentemente dos reforços particulados, as fibras possuem uma dimensão significativamente maior que as outras duas, permitindo uma transferência de carga mais eficiente e um controle direcional das propriedades mecânicas. As fibras podem ser classificadas como contínuas ou descontínuas (fibras curtas), sendo que as fibras contínuas oferecem o máximo potencial de reforço devido à sua capacidade de suportar cargas ao longo de todo o comprimento do componente. Uma categoria especial dentro dos reforços fibrosos são os whiskers, que representam monocristais fibrosos com elevado grau de perfeição cristalina, resultando em resistências mecânicas próximas aos limites teóricos. Os whiskers de carboneto de silício (SiC) são particularmente notáveis por sua dureza, elevado módulo de elasticidade e excelente resistência química e térmica a altas temperaturas (Shi *et al.*, 2022; Soltys *et al.*, 2023).

Entre as fibras sintéticas convencionais, destacam-se três tipos principais: a fibra de vidro, que é a mais utilizada devido ao seu baixo custo e boas propriedades de isolamento, sendo classificada em tipos como E-glass (uso geral) e S-glass (alta resistência); a fibra de carbono, que se destaca por seu altíssimo módulo de elasticidade e baixa densidade, sendo o reforço de escolha para aplicações aeroespaciais; e as fibras de aramida (como o Kevlar®), conhecidas por sua excepcional tenacidade e resistência ao impacto. Esta versatilidade e eficiência dos reforços fibrosos sintéticos estabeleceu um padrão de desempenho para aplicações estruturais de alta responsabilidade (Gama *et al.*, 2019).

## 2.2 Compósitos Poliméricos

Os compósitos de matriz polimérica constituem a categoria mais comercialmente relevante de materiais compósitos, representando aproximadamente 90% do mercado global destes materiais. Esta predominância deve-se à combinação única de características que os polímeros oferecem como matriz: baixa temperatura de processamento (tipicamente entre  $120^\circ\text{C}$  e  $180^\circ\text{C}$  para termorrígidos), excelente moldabilidade para geometrias complexas e capacidade de formar interfaces químicas eficientes com diversos tipos de reforço. A natureza

viscoelástica dos polímeros também confere aos compósitos uma superior capacidade de absorção de energia de impacto quando comparados a compósitos de matriz cerâmica ou metálica, tornando-os especialmente adequados para aplicações onde a tenacidade é um requisito crítico (Gomes, 2020).

Em matrizes termorrígidas, a formação de ligações covalentes secundárias e o entrelaçamento molecular durante o processo de cura criam uma zona de transição com propriedades intermediárias entre a matriz pura e o reforço. Já em matrizes termoplásticas, a interface é governada principalmente por forças de van der Waals e interações mecânicas, resultando em mecanismos de falha distintos, como o *pull-out* de fibras e a decoesão interfacial, que conferem maior tenacidade ao material final. Estudos comparativos mais recentes confirmam essas diferenças de comportamento interfacial entre matrizes termorrígidas e termoplásticas, evidenciando maior sensibilidade à decoesão e ao *pull-out* em matrizes termoplásticas e o papel determinante das reações de cura na formação da zona de interfase em termorrígidos (Cândido *et al.*, 2000; Assaf *et al.*, 2022).

O comportamento dos compósitos poliméricos é fortemente influenciado por fatores ambientais, particularmente temperatura e umidade, que afetam tanto a matriz quanto a interface fibra-matriz. Estudos demonstram que compósitos submetidos a condições higrotérmicas severas (80 °C e 90 % de umidade) podem apresentar reduções drásticas na resistência à tração transversal, chegando a perdas de até 51 % quando ensaiados em temperatura elevada. Esta degradação é atribuída principalmente ao comprometimento da matriz polimérica, que sofre alterações estruturais sob a ação combinada de temperatura e umidade, resultando em falhas interfaciais e redução da capacidade de transferência de carga. Adicionalmente, a suscetibilidade à degradação por radiação ultravioleta e a limitada resistência a solventes orgânicos representam desafios técnicos que devem ser considerados no projeto de componentes para aplicações externas ou em contato com fluidos agressivos, tornando fundamental a seleção criteriosa da matriz e a implementação de tratamentos superficiais adequados para otimizar a durabilidade dos compósitos poliméricos. Estudos recentes confirmam esses efeitos e destacam que o envelhecimento higrotérmico prolongado pode causar plastificação da matriz e perda progressiva de rigidez, especialmente em compósitos reforçados com fibras naturais (Cunha; Rezende; Costa, 2006; Bhuvaneshwari *et al.*, 2022).

### 2.2.1 Compósitos reforçados com fibras

Os compósitos reforçados com fibras constituem a categoria mais sofisticada e versátil de materiais compósitos, onde o reforço fibroso atua como o principal elemento de sustentação de carga. A classificação fundamental destes materiais baseia-se na geometria e continuidade das fibras, dividindo-se em dois grupos principais: compósitos reforçados com fibras contínuas e compósitos reforçados com fibras descontínuas (ou curtas). As fibras contínuas, com comprimento teoricamente ilimitado, são produzidas por processos de extrusão ou fiação e permitem a fabricação de laminados com propriedades direcionais extremamente elevadas. Já as fibras descontínuas, com comprimentos finitos que variam tipicamente de poucos milímetros a alguns centímetros, oferecem maior facilidade de processamento e propriedades mais isotrópicas, sendo especialmente adequadas para geometrias complexas e processos de moldagem por injeção. Revisões recentes confirmam essa classificação e descrevem avanços em técnicas de processamento e modelagem para fibras descontínuas alinhadas que permitem alcançar desempenho próximo ao das fibras contínuas em aplicações industriais (Ventura, 2009; Lewis *et al.*, 2024).

A arquitetura dos compósitos fibrosos é determinada pela forma como as fibras são organizadas e orientadas dentro da matriz. Em compósitos unidirecionais, todas as fibras são alinhadas em uma única direção, resultando em propriedades mecânicas excepcionais nesta direção específica, mas com limitações significativas nas direções transversais. Para superar esta limitação, são desenvolvidos laminados multidirecionais, onde camadas (lâminas) com diferentes orientações de fibras são empilhadas em sequências específicas. As configurações de empilhamento mais comuns incluem arranjos como  $0^\circ/90^\circ$ ,  $0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ$ , e  $0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$ , onde cada ângulo representa a orientação das fibras em relação a um eixo de referência. Estudos demonstram que a configuração  $0^\circ/0^\circ/0^\circ$  (unidirecional) pode alcançar resistências à tração de até 69 MPa em compósitos de fibra de juta, enquanto configurações cruzadas como  $0^\circ/90^\circ/0^\circ$  apresentam valores menores (42 MPa), mas com maior isotropia no plano (Borges *et al.*, 2025).

O processamento de compósitos fibrosos envolve técnicas específicas que variam conforme o tipo de fibra e matriz utilizados. A laminação manual (hand lay-up) é o método mais tradicional e amplamente utilizado, especialmente para protótipos e pequenas séries, onde camadas de fibras são impregnadas manualmente com resina líquida e empilhadas sequencialmente sobre um molde. Para aplicações de maior volume e qualidade, empregam-se técnicas como a moldagem por transferência de resina (RTM - Resin Transfer Molding),

onde as fibras secas são posicionadas em um molde fechado e a resina é injetada sob pressão, garantindo melhor controle da fração volumétrica de fibras e redução de vazios. Processos mais avançados incluem a pultrusão, para perfis de seção constante, e a colocação automatizada de fitas (Automated Tape Laying - ATL), utilizada na indústria aeroespacial para componentes de alta performance. Estudos recentes confirmam a aplicabilidade industrial e detalham que o RTM favorece controle de fibras e baixa porosidade, enquanto ATL proporcionam alta repetibilidade e qualidade de superfície em peças de alto desempenho (Cândido *et al.*, 2000; Ashrith *et al.*, 2023).

Os mecanismos de falha em compósitos fibrosos são complexos e multifacetados, envolvendo diferentes modos que podem ocorrer isoladamente ou em combinação. A falha por tração das fibras ocorre quando a tensão aplicada excede a resistência última das fibras na direção de carregamento, sendo o modo preferencial em compósitos bem projetados com fibras contínuas e alinhadas. A falha da matriz manifesta-se através de microtrincas que se propagam perpendicularmente às fibras, geralmente iniciando-se em regiões de concentração de tensões ou defeitos. A delaminação, caracterizada pela separação entre camadas adjacentes do laminado, é particularmente crítica em configurações com grandes diferenças angulares entre lâminas consecutivas. O cisalhamento interfacial, que ocorre na região de contato entre fibra e matriz, é governado pela qualidade da adesão e pode resultar no fenômeno de pull-out, onde as fibras são arrancadas da matriz sem se romperem. A análise fractográfica revela que configurações com menor alinhamento das fibras à direção da carga apresentam falhas mais intensas por delaminação e propagação de trincas, evidenciando a importância crítica da orientação no projeto estrutural (Borges *et al.*, 2025; Naglis *et al.*, 1998).

As fibras naturais, ou lignocelulósicas, representam uma fronteira emergente nos compósitos estruturais, oferecendo vantagens únicas como renovabilidade, biodegradabilidade, baixa densidade e custo reduzido. Entretanto, sua natureza hidrofílica cria desafios fundamentais de compatibilidade com matrizes poliméricas convencionais, que são predominantemente hidrofóbicas. Esta incompatibilidade resulta em interfaces fracas, absorção de umidade e instabilidade dimensional, limitando o desempenho mecânico dos compósitos. Para superar estas limitações, são empregados tratamentos superficiais específicos, sendo a mercerização (tratamento alcalino com NaOH) o mais difundido. Este processo remove componentes amorfos como lignina e hemicelulose, aumenta a rugosidade superficial e expõe grupos hidroxila da celulose, melhorando significativamente a adesão interfacial. Tratamentos alternativos incluem silanos, acetilação, e modificações com nanopartículas, cada um oferecendo mecanismos específicos de melhoria da compatibilidade

fibra-matriz, abrindo caminho para uma nova geração de compósitos sustentáveis com desempenho competitivo (Miranda *et al.*, 2015; Wearn *et al.*, 2020).

### 2.3 Buriti (*Mauritia Flexuosa*)

O buriti (*Mauritia flexuosa*) é uma palmeira de grande porte, característica de ambientes periodicamente ou permanentemente alagados da Amazônia e de veredas no Cerrado, onde frequentemente forma povoamentos densos, chamados de “buritizais”. Esses povoamentos desempenham papel chave na regulação hídrica local, na proteção de nascentes e na manutenção de habitats especializados, funcionando também como focos de biodiversidade e corredores para fauna associada (Vieira *et al.*, 2015; Ferreira *et al.*, 2022).

A espécie apresenta longa longevidade e morfologia que favorece o aproveitamento multifuncional de suas diferentes partes: polpa rica em carotenoides e lipídios (valiosa para a indústria alimentícia e cosmética), sementes e fibras para artesanato, pecíolos e estipe para usos em construção e mobiliário, e medula com usos alimentares locais (Vieira *et al.*, 2015; Ferreira *et al.*, 2022).

Relatos e inventários recentes destacam variações regionais na estrutura dos buritizais e nos serviços ecossistêmicos providos, além de apontarem a relevância do buriti para a segurança alimentar e para economias locais extrativistas. Por isso, estudos e diretrizes contemporâneas enfatizam práticas de manejo participativo, monitoramento e medidas de conservação que conciliem uso e manutenção dos serviços ecossistêmicos (Vieira *et al.*, 2015; Ferreira *et al.*, 2022). A Figura 4 a seguir mostra a palmeira de buriti .

**Figura 4** – Palmeira do Buriti



Do ponto de vista socioeconômico, o buriti sustenta cadeias produtivas extrativistas tradicionais que movimentam comunidades rurais e ribeirinhas da região Norte. A extração de linho (fibra das folhas/pecíolos) e a confecção de artesanato constituem importante fonte de renda e trabalho, especialmente para mulheres artesãs; a polpa e o óleo do fruto têm mercado crescente na indústria alimentícia e cosmética, enquanto subprodutos (sementes, talos) são empregados em artesanato e bioinsumos. Manuais e estudos técnico- sociais demonstram que a valorização dos produtos do buriti (polpa, óleo e artigos de fibra) tem contribuído para geração de renda local, promoção de arranjos produtivos e estímulo ao turismo rural, embora exista grande variabilidade regional na organização dessas cadeias. Relatórios e diagnósticos regionais recentes também registram iniciativas de fortalecimento de cooperativas e planos de gestão que promovem agregação de valor e renda local (Sampaio; Carraza, 2012; Sousa; Perpétuo, 2016; SEMA, 2020).

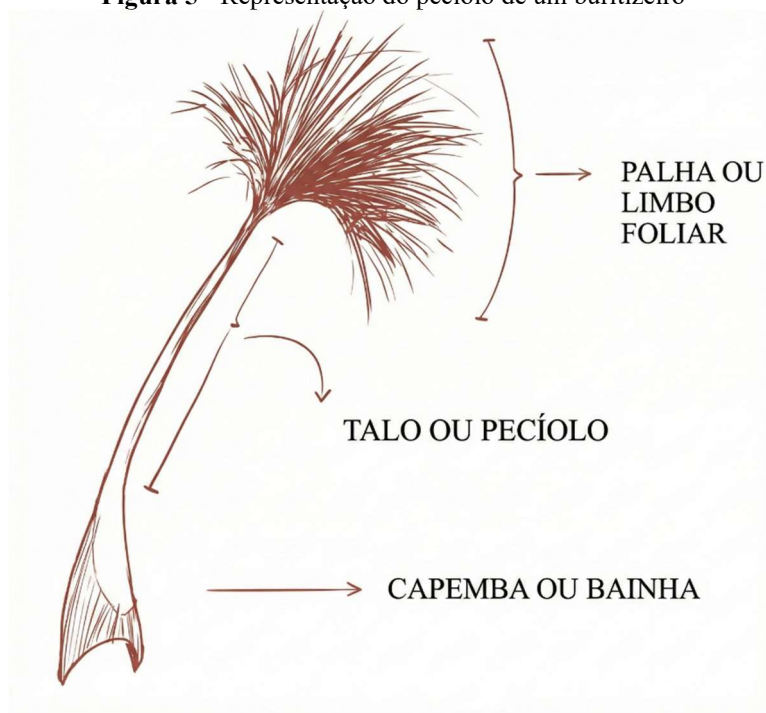
No contexto de inovação e industrialização de insumos amazônicos, pesquisas recentes têm explorado usos emergentes do buriti, como por exemplo, a incorporação do óleo de buriti em matrizes poliméricas como plastificante para melhorar propriedades reológicas e mecânicas, e a utilização de fibras e espuma de buriti em materiais para construção leve e isolantes. Essas iniciativas apontam caminhos para agregação de valor e diversificação de mercado, integrando conhecimentos locais a processos tecnológicos. Essas atividades, no entanto, demandam cuidado com certificação de qualidade, BPA, rastreabilidade e boas práticas de manejo para evitar exploração insustentável dos recursos naturais. (Leite-Barbosa *et al.*, 2024; Siqueira *et al.*, 2021).

Os desafios centrais para transformar o potencial do buriti em desenvolvimento regional sustentável incluem: implementação de práticas de manejo que permitam a extração sem comprometimento das populações, agregação de valor com tecnificação compatível (unidades de beneficiamento e boas práticas descritas em manuais técnicos), políticas públicas e arranjos cooperativos que assegurem preço justo e acesso a mercados. A literatura da região Norte enfatiza que estratégias territorializadas, baseadas em conhecimento local e apoio técnico, são as mais promissoras para conciliar conservação dos buritizais com renda e bem-estar comunitário. Adicionalmente, estudos ressaltam a necessidade de políticas públicas integradas, como instrumentos de garantia de preço mínimo para produtos sociobiodiversos, financiamento à infraestrutura de beneficiamento e programas de P&D e assistência técnica para aumentar a escala produtiva sem promover a monocultura ou exaurir os recursos locais (Sampaio; Carraza, 2012; Sousa; Perpétuo, 2016; Clement *et al.*, 2024).

### 2.3.1 Pecíolo do Buriti

O pecíolo do buriti, como mostrado na Figura 5 é a estrutura que liga a lâmina da folha ao tronco (estipe) e cumpre funções básicas de suporte e condução. Em plantas adultas tem seção robusta, isto é, é espesso e resistente para sustentar as grandes folhas pinadas e resistir a ventos e ao movimento da água nos ambientes alagados onde a espécie cresce. Essa resistência física torna o pecíolo um componente-chave da planta, responsável por proteger a região de brotação e por manter a integridade da folhagem. Adicionalmente, o pecíolo é composto por casca e miolo com propriedades distintas: a casca apresenta maior teor de lignina e maior estabilidade térmica, enquanto o miolo é menos denso e é amplamente aproveitado em trabalhos de artesanato. Contudo, ambos apresentam baixo teor de cinzas e comportamento térmico adequado para usos energéticos e tecnológicos, o que reforça sua versatilidade para aplicações locais e industriais (Vieira *et al.*, 2015; Souza *et al.*, 2020).

**Figura 5** - Representação do pecíolo de um buritizeiro



**Fonte:** Adaptado de Fundo Amazônia; ISPN, s.d.

Internamente, o pecíolo é formado por uma camada externa de proteção, um núcleo mais “macio” com células que armazenam água e nutrientes, e vários canais condutores que levam seiva. Ao redor desses canais e próximos à periferia, localizam-se faixas de células fibrosas mais rígidas que conferem a maior parte da resistência mecânica. Estudos anatômicos mostram que essa distribuição com um miolo mais poroso e hidratado e uma periferia progressivamente mais lignificada funciona como um arranjo natural de reforço, em que a

rigidez aumenta da região interna para a externa. Essa organização estrutural também explica o comportamento observado em análises físico-químicas, que identificam maior densidade, maior teor de lignina e maior resistência na casca, contrastando com o centro leve e acomodador de umidade, características determinantes para os diferentes usos do pecíolo em artesanato, construção leve e aplicações energéticas (Sampaio; Carrazza, 2012; Souza *et al.*, 2020).

As fibras aproveitadas comercialmente (o linho de buriti) estão nessas camadas fibrosas externas que envolvem os canais condutores, sendo relativamente longas e resistentes, o que as torna adequadas para artefatos, cordoaria e compósitos de baixa a média exigência. A qualidade final depende diretamente do processamento: secagem adequada e remoção do tecido central mais macio preservam o comprimento e evitam fragilização. As práticas de beneficiamento que controlam a umidade e a separação entre casca e miolo mantêm maior integridade estrutural e regularidade dimensional das fibras, que são fatores decisivos para aplicações industriais e para reduzir perdas durante o preparo. Por esse motivo, quando o objetivo é a produção de fibras, o pecíolo permanece o foco técnico-econômico central da cadeia de aproveitamento do buriti (Sousa; Perpétuo, 2016; Souza *et al.*, 2020).

### 2.3.2 Propriedades da fibra do buriti

A fibra de buriti, obtida principalmente do pecíolo e das bainhas foliares, é um material lignocelulósico de destaque entre as fibras naturais brasileiras, tanto pela sua abundância regional quanto pelas propriedades físico-químicas equilibradas. Em observação macroscópica e por microscopia, as fibras mostram coloração castanho-clara, superfície levemente porosa e estrutura alongada, atributos que facilitam a adesão em matrizes poliméricas e a retenção de corantes em aplicações artesanais; a morfologia porosa também reduz a densidade aparente, conferindo leveza ao produto final. Estudos recentes quantificam essa variabilidade: as fibras apresentam faixas de densidade relativamente baixas ( $0,63 - 1,12 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) e comportamento térmico adequado para processamento até temperaturas de degradação moderadas, enquanto análises lignocelulósicas indicam uma elevada quantidade de celulose e fração de lignina, o que resulta em boa resistência mecânica e estabilidade térmica para aplicações estruturais leves (Salgado, 2014; Da Silveira *et al.*, 2024; Guimarães *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2020).

Quimicamente, a celulose é responsável pela rigidez e resistência à tração, enquanto a lignina atua como agente de coesão e confere estabilidade térmica. Estudos indicam que a degradação térmica da fibra se inicia em torno de  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , mantendo estabilidade até

aproximadamente 350 °C, o que possibilita seu uso em compósitos processados a baixas temperaturas (Lavoratti *et al.*, 2011; Demosthenes *et al.*, 2020). Ensaios de espectroscopia no infravermelho (FTIR) confirmam a presença de grupos hidroxila e carbonila, típicos de fibras vegetais, o que justifica a aplicação de tratamentos superficiais alcalinos ou silânicos para reduzir a absorção de umidade e melhorar a compatibilidade com matrizes hidrofóbicas (Ornaghi Júnior *et al.*, 2016; Alao *et al.*, 2021).

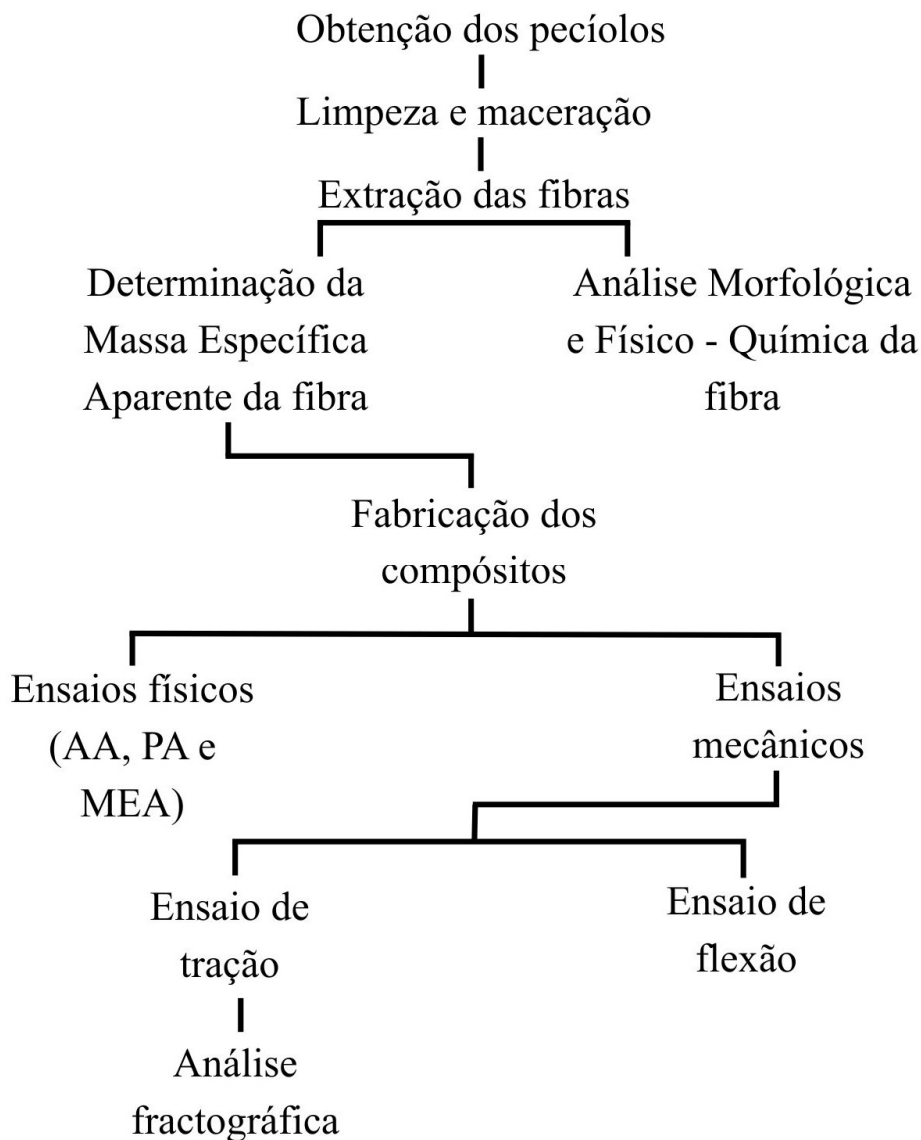
Morfologicamente, análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelam uma superfície composta por feixes longitudinais e cavidades internas (lúmen) alinhadas, responsáveis pelo comportamento mecânico da fibra. Estudos de caracterização indicam resistência à tração na faixa aproximada de 129 a 254 MPa, valores que variam conforme o diâmetro e o método de tratamento (Demosthenes *et al.*, 2020; da Silveira *et al.*, 2024). Esses valores são comparáveis aos observados em fibras vegetais como sisal e juta, reforçando seu potencial em materiais compósitos e em produtos de base artesanal. Revisões recentes sobre fibras amazônicas demonstram que variações microestruturais (ângulo microfibrilar, lúmen e diâmetro) e procedimentos de extração explicam grande parte da dispersão observada nesses intervalos, orientando estratégias de otimização para aplicações voltadas para a engenharia (Cattani, 2015; Ornaghi Júnior *et al.*, 2016; da Silveira *et al.*, 2024).

Estudos como o de Bastos *et al.* (2019) também destacam o bom desempenho da fibra de buriti como reforço em matrizes cimentícias e poliméricas. No estudo, observaram aumento de até 40% na resistência à flexão de argamassas reforçadas com fibras tratadas, demonstrando seu potencial em materiais de construção sustentáveis. Entretanto, a elevada capacidade de absorção de água torna indispensável o controle da umidade e o uso de tratamentos superficiais adequados. A padronização das etapas de extração, secagem e beneficiamento é essencial para garantir uniformidade de propriedades e maior durabilidade dos produtos finais.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

As fabricações dos compósitos poliméricos reforçados com fibras de buriti ocorreram nas instalações do Laboratório de Catálise (LABCAT) do Laboratório de Engenharia Química (LEQ), na Universidade Federal do Pará (UFPA). O processo metodológico empregado está esquematizado no fluxograma da Figura 6. A primeira etapa consistiu na coleta dos pecíolos de buriti, da qual as fibras foram extraídas manualmente. Subsequentemente, as fibras foram caracterizadas quanto às suas propriedades e, na sequência, incorporadas a uma matriz polimérica em distintas frações mássicas para a produção dos corpos de prova, que foram então destinados aos ensaios de caracterização.

**Figura 6** - Fluxograma do processo de fabricação dos compósitos

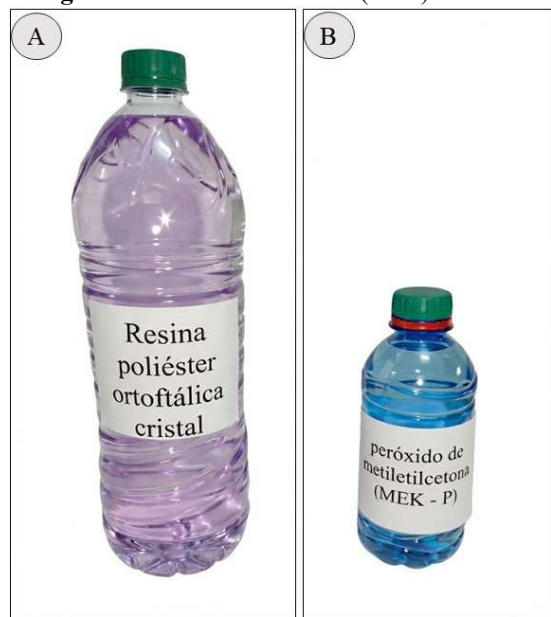


### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Matriz

A matriz polimérica empregada neste trabalho foi uma resina poliéster insaturada do tipo ortoftálica (Fortcom 6100), com massa específica entre  $1,10 \text{ g/cm}^3$  a  $1,20 \text{ g/cm}^3$ , conforme a ficha técnica do fabricante. A cura da resina foi promovida pela adição do iniciador peróxido de metil-etil-cetona (MEK-P), comercialmente conhecido como Butanox M-50, na proporção de 1% em massa (m/m). A resina e o ativador utilizados neste estudo são apresentados por meio da Figura 7.

Figura 7 – Resina e Ativador (a – b)



Fonte: Autor, 2026

#### 3.1.2 Fibras do Buriti

A matéria-prima utilizada para a fase reforço dos compósitos, a fibra de buriti (*Mauritia flexuosa*), é proveniente da vila de Tauajó (Cametá-PA). Os pecíolos do buriti foram coletados em julho de 2025 e doados pela comunidade local. A Figura 8 mostra o aspecto visual do material, tal como foi recebido para a execução deste estudo.

**Figura 8** – Pecíolos do buriti

**Fonte:** Autor, 2026

### 3.2 Métodos

O pré-tratamento dos pecíolos iniciou-se com uma limpeza para remover detritos e impurezas ou ceras vegetais. A etapa subsequente consistiu na remoção manual da casca com uma lâmina, isolando o tecido interno, composto por um parênquima rico em fibras. O material foi então submetido a um processo de maceração, que consistiu em uma imersão inicial em água por 24 horas. Decorrido este período, o material foi cortado longitudinalmente e novamente imerso por mais 24 horas, a fim de facilitar a desagregação dos tecidos e a posterior extração das fibras. Todas as etapas foram feitas em ambiente refrigerado a temperatura média de 24 °C.

#### 3.2.1 Extração das fibras

Decorrida a etapa final de maceração, deu-se início à extração manual dos feixes das fibras. O procedimento foi realizado com auxílio de uma faca de lâmina, buscando-se preservar a continuidade e a integridade estrutural das fibras ao longo de todo o seu comprimento. A Figura 9 mostra a imagem das fibras obtidas, após a remoção da umidade residual por secagem.

**Figura 9** – Fibras de buriti

**Fonte:** Autor, 2026

### 3.2.1.1 Massa específica das fibras

A determinação da massa específica aparente das fibras de buriti foi conduzida por meio do método da picnometria. Inicialmente, as fibras foram submetidas a cortes transversais, de modo a padronizar seu comprimento em 15 mm. Em seguida, procedeu-se à determinação da massa das amostras, sendo utilizadas 0,1 g de fibras em cada ensaio. Na sequência, iniciou-se a aferição sequencial das massas do picnômetro em diferentes condições: vazio ( $m_1$ ), contendo uma porção de fibras secas ( $m_2$ ), contendo as fibras e completamente preenchido com água destilada ( $m_3$ ), e, por fim, preenchido somente com água destilada ( $m_4$ ). A massa específica aparente das fibras foi então calculada utilizando a Equação 1, que correlaciona as massas aferidas com a massa específica da água destilada ( $\rho_{H_2O}$ ) à temperatura do ensaio.

$$MEA = \frac{m_2 - m_1}{(m_4 + m_2) - (m_1 + m_3)} * \rho_{H_2O} \quad (1)$$

Os ensaios foram realizados em 12 repetições independentes, conduzidas sob as mesmas condições experimentais, a fim de garantir maior confiabilidade estatística aos resultados. Assim, o valor final da massa específica aparente das fibras foi obtido a partir da média aritmética entre os ensaios realizados.

### 3.2.1.2 Morfologia das fibras

Para a investigação da morfologia superficial, as fibras de buriti foram analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). O equipamento utilizado foi o Microscópio eletrônico de varredura de bancada Hitachi TM3000, acoplado a um analisador de dispersão de raios X SwiftED3000, pertencente ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LabMEV) do LEQ-UFPA. A preparação das amostras consistiu em cortar as fibras longitudinalmente em tamanhos padrões de 15 mm, seguida de uma etapa de secagem em estufa a 100°C por 15 min para eliminar a umidade residual. Sendo um material não condutor, as fibras foram então montadas em um porta-amostras. As análises foram conduzidas operando com uma voltagem de aceleração do feixe de elétrons de 15 kV, e as imagens foram geradas a partir do sinal dos elétrons secundários (SE). A Figura 10 a seguir mostra o equipamento.

**Figura 10** – Microscópio Eletrônico de Varredura



**Fonte:** Autor, 2026

### 3.2.1.3 Teor de umidade da fibra de buriti

O teor de umidade das fibras de buriti foi determinado utilizando-se uma balança analisadora de umidade por radiação infravermelha (Bel engineering/ i-Thermo G). Para a análise, cerca de 0,5 gramas de fibras foram previamente fragmentadas em comprimentos de aproximadamente 15 mm. A amostra foi disposta uniformemente no prato da balança e submetida a um programa de aquecimento a 105 °C em modo automático. O equipamento monitorou a perda de massa por evaporação de forma contínua até a estabilização do peso (critério de massa constante), fornecendo diretamente o resultado do teor de umidade em base

úmida (U%). A análise foi feita no Laboratório de Biossoluções e Bioplásticos da Amazônia (LABA), pertencente ao Laboratório de Engenharia química da (LEQ – UFPA). A Figura 11 mostra o equipamento.

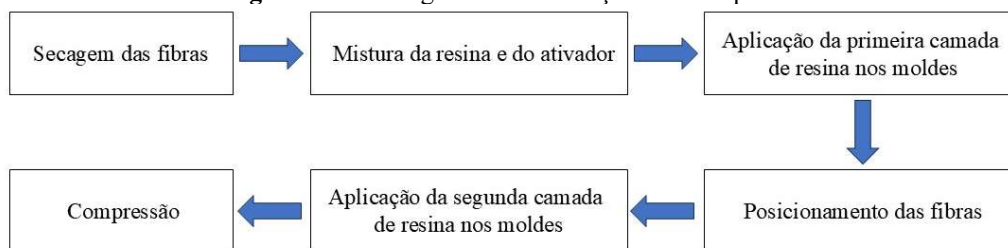
**Figura 11** - Balança determinadora de umidade



**Fonte:** Autor, 2026

### 3.2.2 Fabricação dos compósitos

O procedimento experimental para a fabricação dos compósitos foi estabelecido com base em frações mássicas, utilizando-se moldes de silicone com capacidade para quatro corpos de prova (CPs). As formulações foram compostas por uma matriz polimérica de resina poliéster insaturada, juntamente com a carga (fibras de buriti) e um iniciador de cura (MEK-P). A proporção do iniciador foi fixada em 1% m/m (massa/massa) em relação à matriz em todas as configurações, seguindo a metodologia de Fernandes, 2025. A Figura 12 apresenta o fluxograma de fabricação dos compósitos.

**Figura 12** - Fluxograma de fabricação dos compósitos

**Fonte:** Autor, 2026

O principal parâmetro variável do estudo foi a fração mássica do reforço, definindo-se cinco sistemas distintos com 0%, 1%, 3%, 5% e 7% de fibras, metodologia baseada em Monteiro, 2025. A formulação com 0% de fibra, constituída apenas pela matriz polimérica curada, foi produzida para servir como corpo de prova de controle para os ensaios. Para cada uma das cinco formulações, produziu-se um número mínimo de 8 CPs para garantir a reprodutibilidade estatística dos resultados.

O procedimento de fabricação dos corpos de prova iniciou-se com a preparação do reforço. Nessa etapa as fibras foram cortadas em comprimentos de 160 mm, com auxílio de uma tesoura e submetidas a um processo de secagem em estufa a 100 °C por 20 minutos para a remoção de umidade. Imediatamente após a secagem, a massa total de fibras necessária para a fabricação foi aferida e separada.

Em paralelo, a matriz polimérica foi preparada pela pesagem da resina e do iniciador (MEK-P), que foram homogeneizados manualmente por um minuto. O processo de fabricação manual (*hand lay-up*) consistiu em aplicar uma fina camada da matriz em cada cavidade do molde, seguida pelo posicionamento de uma alíquota de fibras. O restante da resina foi então vertido sobre o reforço para garantir a melhor molhabilidade das fibras, segundo metodologia de Fernandes, 2025.

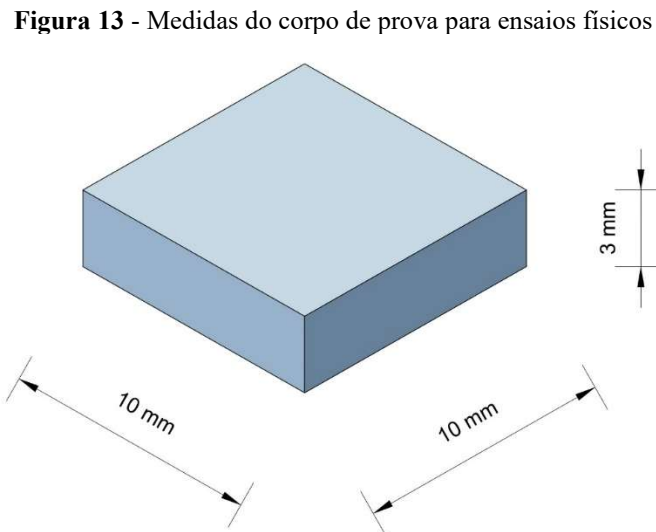
Ainda seguindo a metodologia de Fernandes, 2025, após a resina atingir seu tempo de gel, uma chapa metálica de 2,45 kg foi colocada sobre o conjunto, aplicando uma compressão total de aproximadamente 24 N por 20 minutos. Com isso, os CPs foram mantidos em processo de cura à temperatura ambiente por 3 dias antes da desmoldagem e mais 4 dias até a cura.

Para os ensaios de flexão os corpos de prova foram fabricados seguindo o mesmo procedimento, alterando-se apenas a geometria do molde. Conseqüentemente, para estes ensaios, o comprimento nominal dos corpos de prova foi de 125 mm, sendo as fibras previamente cortadas em 120 mm.

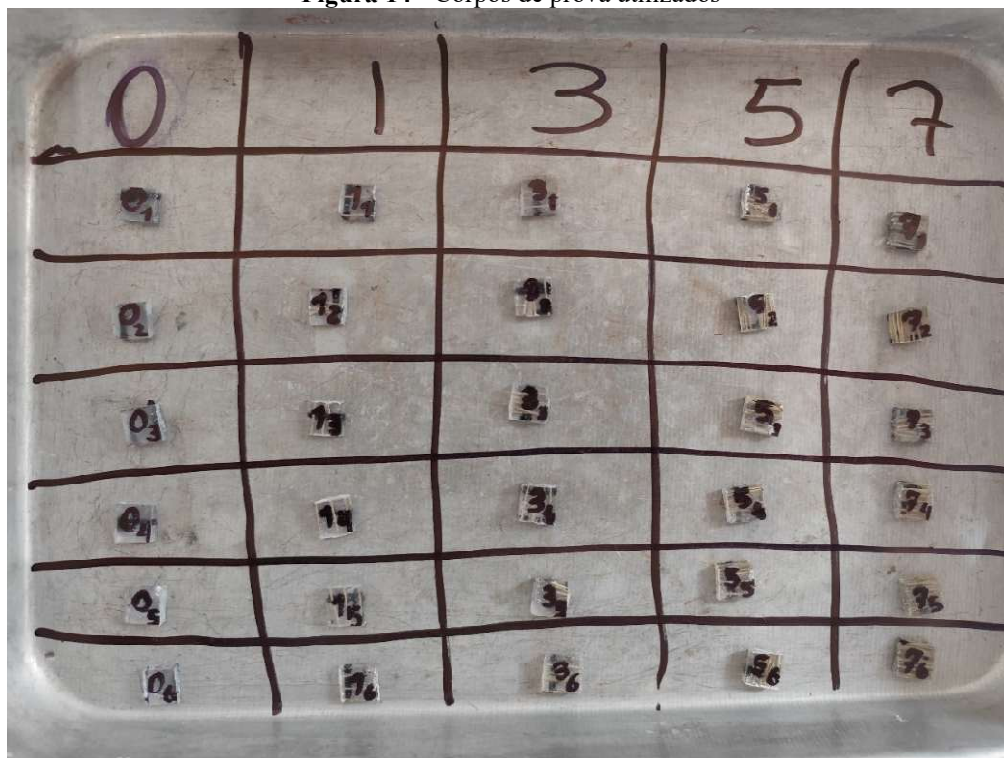
### 3.2.3 Ensaio físicos dos compósitos

Os ensaios físicos dos compósitos foram realizados no Laboratório de Catálise e Biocatálise (LABCAT) da Universidade Federal do Pará e consistem na determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água. Os ensaios são regidos pelas normas ASTM D792, ASTM D2734 e ASTM D570 respectivamente.

Para a realização do ensaio foram utilizados 5 corpos de prova (CPs) de cada uma das composições, todos com as mesmas dimensões de 10 mm de comprimento, 10 mm de largura. A seguir, as Figuras 13 e 14 mostram as dimensões e os CPs utilizados nos ensaios, respectivamente.



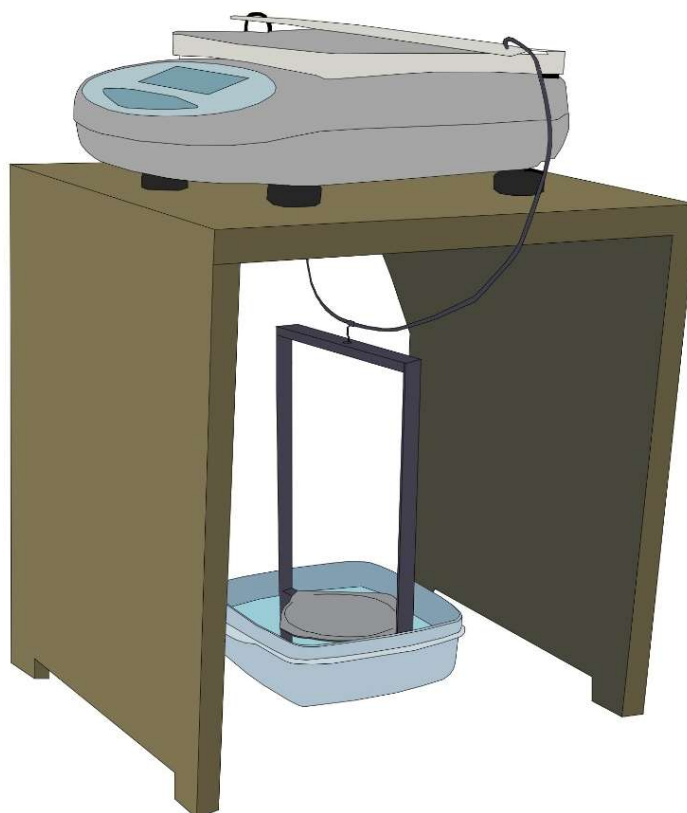
**Fonte:** Autor, 2026

**Figura 14** - Corpos de prova utilizados

**Fonte:** Autor, 2026

Para a determinação da massa seca ( $M_s$ ) os CPs foram submetidos a secagem por meio de uma estufa operando a 100 °C durante 24 horas. Após isso, foram submetidos a pesagem em uma balança analítica. Para a determinação da massa úmida ( $M_u$ ) os CPs foram deixados em estado de imersão completa em água destilada durante 24 horas e posteriormente tiveram sua massa aferida com o auxílio de uma balança analítica. Para a determinação da massa imersa ( $M_i$ ) foi montada uma estrutura com o auxílio de uma balança analítica, um suporte de madeira, uma estrutura de metal e um recipiente com água destilada na base, de forma que os CPs ficassem imersos em água destilada no momento da determinação da massa. A Figura 15 ilustra os equipamentos usados para o ensaio.

**Figura 15** - Ilustração do aparato para medir a massa imersa



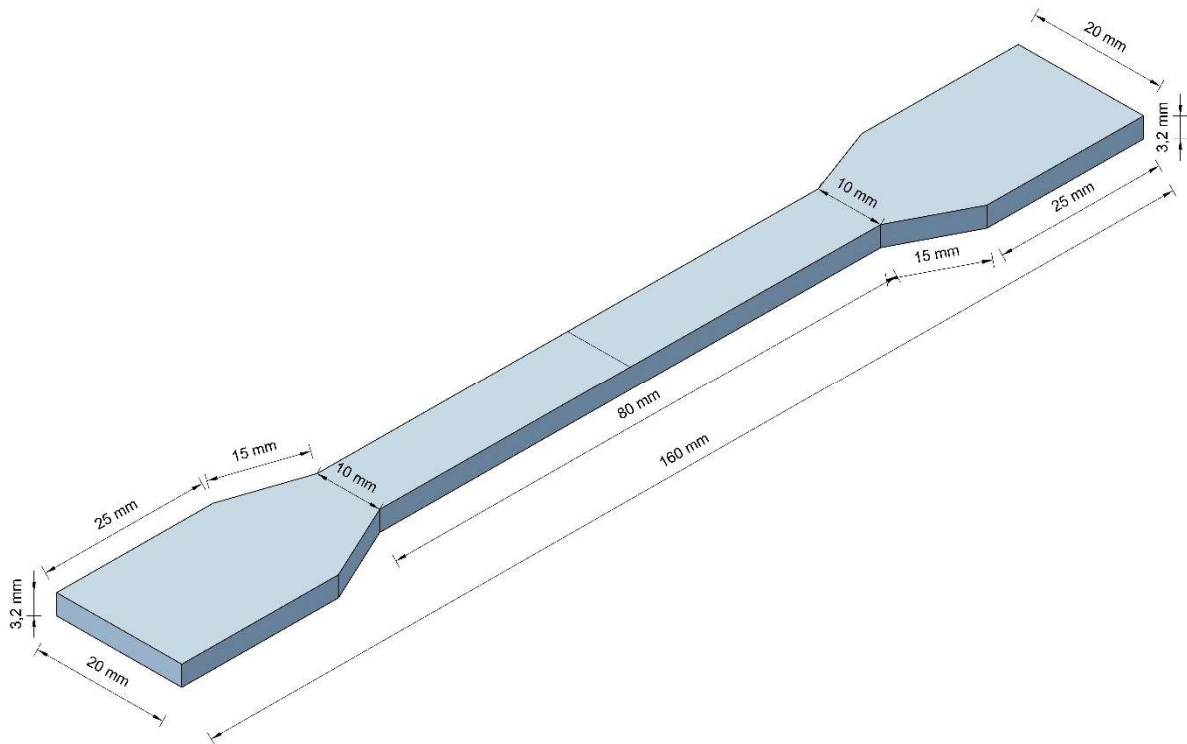
**Fonte:** Autor, 2026

### 3.2.4 Ensaios mecânicos

#### 3.2.4.1 Ensaio de tração

Previamente aos ensaios de tração, os corpos de prova (CPs) foram submetidos a um processo de preparação e acabamento. Realizou-se uma lixagem manual para a remoção de imperfeições superficiais oriundas do processo de fabricação. Para assegurar a correta organização, cada CP foi identificado com um código numérico sequencial e a indicação de sua respectiva formulação (fração mássica de fibra). Adicionalmente, a seção útil de cada amostra foi delimitada por marcas de referência, estabelecendo um comprimento de análise de 80 mm, região dentro da qual a fratura é considerada válida. As dimensões do corpo de prova estão ilustradas na Figura 16.

**Figura 16** - Medidas do corpo de prova para tração



**Fonte:** Autor, 2026

Uma vez preparados, os ensaios foram realizados seguindo a norma ASTM D638 (2014) e conduzidos no Laboratório de Engenharia Mecânica (LABEM) da UFPA, utilizando-se uma máquina de ensaio universal da marca KRATOS, modelo IKCL1-USB equipada com uma célula de carga de 5 kN a uma velocidade de 5 mm/min, mostrada na Figura 17. Cada corpo de prova foi fixado individualmente às garras da máquina e submetido a uma carga de tração uniaxial, com velocidade de ensaio constante, até a ocorrência de sua fratura. O objetivo do ensaio foi determinar as seguintes propriedades mecânicas do material: o limite de resistência à tração (LRT), a força máxima suportada, a deformação na ruptura (alongamento) e o módulo de elasticidade. Após a fratura, as duas partes de cada corpo de prova foram cuidadosamente recolhidas e acondicionadas em invólucros individuais, visando proteger as superfícies de fratura contra danos ou contaminação e, assim, preservar sua morfologia para a posterior análise fractográfica.

**Figura 17** - Máquina da marca KRATOS

Fonte: Autor, 2026

Para o ensaio de tração de materiais compósitos com matriz polimérica a tensão de resistência à tração pode ser calculada utilizando a Equação 2.

$$TRT = \frac{F}{A} (MPa) \quad (2)$$

Sendo A a área útil da seção transversal do corpo de prova em mm<sup>2</sup> e F a força aplicada em Newtons (N).

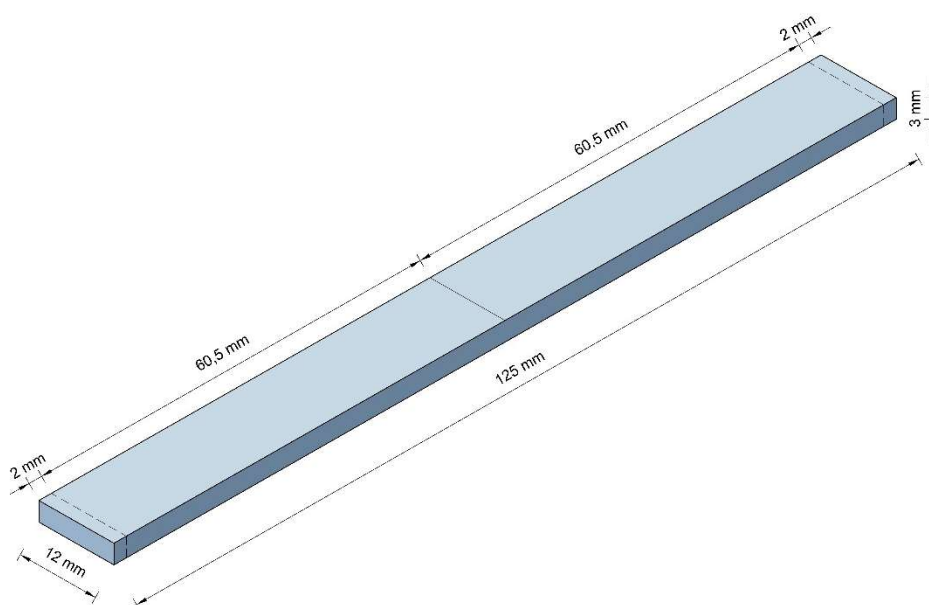
#### 3.2.4.2 Análise fractográfica

A análise fractográfica visa analisar a superfície da fratura do compósito de forma que os mecanismos da falha possam ser estudados analisando possíveis imperfeições geradas no processo de fabricação de cada série confeccionada. Para isso, os corpos de prova com os maiores e menores resultados de cada série (a exceção da matriz plena) foram separados e suas superfícies de fratura foram removidas de forma que pudessem ser analisadas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

### 3.2.4.3 Ensaio de flexão

Assim como nos ensaios de tração, antes dos ensaios de flexão os corpos de prova (CPs) passaram por uma etapa de acabamento visando diminuir possíveis concentradores de tensão que pudessem afetar os resultados. Posteriormente, os corpos de prova foram identificados numericamente de maneira sequencial e foram marcados de acordo com a sua composição percentual em fibras para fins de identificação e coleta adequada de dados. Com isso, os CPs foram demarcados com uma identificação no meio e 2 nas extremidades, exatamente a 2 mm das pontas cada uma. A Figura 18 a seguir mostra as dimensões dos corpos de prova.

**Figura 18** - Medidas do corpo de prova para flexão



**Fonte:** Autor, 2026

Os ensaios de flexão foram realizados no Laboratório de caracterização de Materiais (LACMAT) do grupo de pesquisa em Materiais Compósitos (GPMCOMP) do Campus Universitário de Ananindeua da Universidade Federal do Pará, utilizando-se uma máquina universal de ensaios eletromecânicos iM50 (50 kN), mostrada na Figura 19, seguindo a norma ASTM D790.

Usando como base o método de flexão em 3 pontos os CPs foram posicionados utilizando os 2 apoios da máquina, de forma que a máquina pudesse aplicar uma força uniaxial de velocidade constante no centro. Com isso, são determinadas a resistência a flexão e o alongamento do material compósito.

**Figura 19** - Máquina modelo iM50

**Fonte:** Autor, 2026

Para o ensaio de flexão em 3 pontos a tensão máxima (tensão de resistência a flexão) é calculada por meio da Equação 3.

$$\sigma = \frac{3 * F * L}{2 * b * h^2} (MPa) \quad (3)$$

A tensão de flexão ( $\sigma$ ) representa a resistência máxima do material. A força aplicada no ponto central é determinada por F, cuja unidade é representada em Newtons (N). L representa o vão entre as vigas determinado em mm, b é a largura de cada seção transversal representado também em mm e por último h, que representa a altura da seção transversal do ponto em mm.

### 3.3 Análise estatística

Os dados experimentais obtidos nos ensaios físicos e mecânicos foram processados e analisados com o auxílio do software Statistica. Inicialmente, a normalidade da distribuição dos dados foi verificada por meio do teste de Shapiro-Wilk.

Para as variáveis que atenderam ao pressuposto de normalidade, aplicou-se a Análise de Variância (ANOVA) para verificar a existência de diferenças significativas entre as formulações, seguida pelo teste de comparações múltiplas de Tukey (HSD) para identificar diferenças específicas entre as médias. Nos casos em que a distribuição normal não foi verificada, utilizou-se o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, complementado pelo teste de comparações múltiplas dos postos médios. Todas as análises estatísticas foram conduzidas considerando um nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Massa específica da fibra

A partir dos dados experimentais obtidos por picnometria e da aplicação da Equação 1, determinou-se a massa específica das fibras de buriti. O resultado obtido é apresentado na Tabela 1, onde também é realizada uma análise comparativa com valores da literatura para a própria fibra de buriti e outras fibras lignocelulósicas comumente utilizadas como reforço em compósitos.

**Tabela 1** - Massa específica da fibra e comparações

<b>Tipo de fibra</b>	<b>Massa específica aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Referência</b>
<b>Fibra do pecíolo do buriti</b>	<b>0,489</b>	<b>Este trabalho</b>
Fibra de pseudocaule de banana	0,322	Montoya-Berrio <i>et al.</i> , 2024
Fibra de buriti	0,75 – 1,20	Barbosa, 2011
Fibra de juta	0,68	Kandemir <i>et al.</i> , 2020

**Fonte:** Autor, 2026

A massa específica aparente média das fibras extraídas de buriti obtida neste trabalho foi de 0,489 g/cm<sup>3</sup>. Esse valor caracteriza o volume “visível” ocupado pelas fibras (incluindo poros e lúmen), e é diretamente relevante para aplicações em compósitos pois influencia a relação resistência-peso, a quantidade de fibra necessária para atingir determinada propriedade e o comportamento térmico e de isolamento do material. Na literatura específica sobre o buriti constata-se grande heterogeneidade de resultados, em parte explicada pela diferença entre “massa específica aparente” e “densidade verdadeira”. Estudos voltados para o núcleo esponjoso do pecíolo de buriti reportam densidades aparentes baixas (0,04 a 0,06 g·cm<sup>-3</sup> para bioespuma do buriti), evidenciando a forte porosidade desse material (Batista, 2022; Siqueira *et al.*, 2021).

Por outro lado, outros trabalhos de escopo diferente que avaliam fibras inteiras ou materiais menos descontaminados apresentam valores significativamente maiores. Levantamentos disponíveis indicam densidades aparentes de fibras de buriti variando entre 0,75 e 1,20 g·cm<sup>-3</sup>, com amplitude atribuída a fatores como diâmetro da fibra, espessura de parede celular e proporção de lúmen. Além disso, estudos microestruturais do pecíolo mostram que a razão lúmen/parede e a presença de parênquima residual influenciam diretamente a massa específica aparente de fibras isoladas, reforçando que o valor obtido no

presente trabalho ( $0,489 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) é coerente com frações fibrosas do pecíolo que apresentam porosidade interna elevada e heterogeneidade anatômica (Barbosa, 2011; Demosthenes *et al.*, 2020; da Silveira *et al.*, 2024).

Ao comparar com fibras vegetais estudadas recentemente, observa-se que o valor de  $0,489 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  situa-se na mesma ordem de grandeza de fibras vegetais porosas destinadas a reforço leve: por exemplo, fibras de pseudocaule de banana apresentaram massa específica aparente medida por método de volume compacto em torno de  $0,32 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  (Montoya-Berrio *et al.*, 2024)

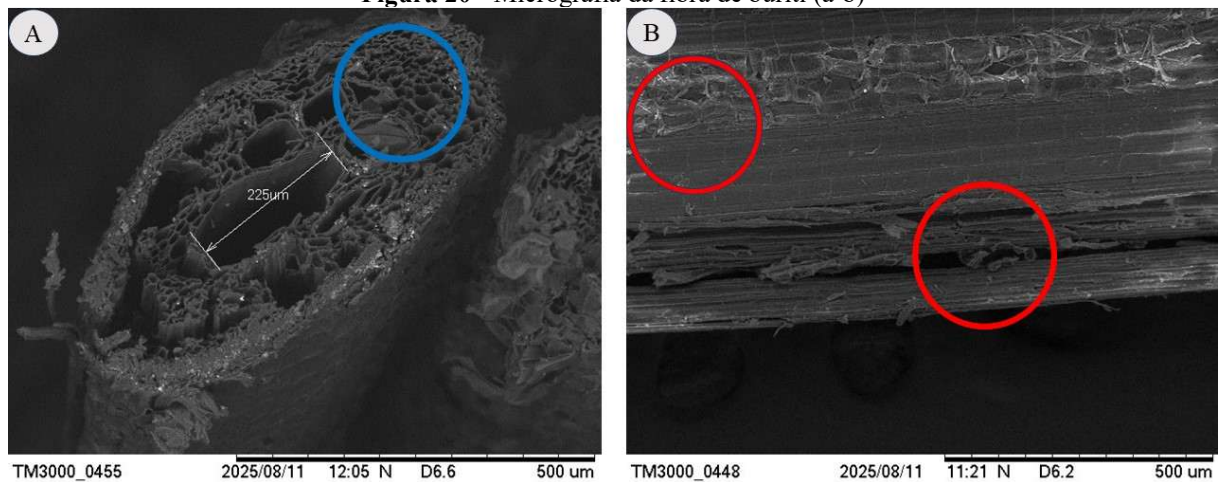
Já compilações e revisões sobre fibras naturais (sisal, juta) mostram intervalos amplos que dependem fortemente do método (aparente vs. verdadeira), tipicamente entre  $0,30$  e  $1,0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  quando se consideram diferentes espécies e graus de preparação (Muñoz- Blandón *et al.*, 2023).

Essas comparações indicam que as fibras do pecíolo do buriti, com massa específica aparente próxima a  $0,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , são competitivas para aplicações que priorizam baixo peso e isolamento, uma vez que materiais lignocelulósicos com baixa densidade apresentam desempenho favorável em termos de leveza e propriedades térmicas. No entanto, para aplicações estruturais, torna-se necessário considerar também a resistência mecânica específica (resistência por unidade de massa) e a qualidade da interface fibra–matriz, fatores determinantes para o desempenho mecânico global do compósito (Batista, 2022; Tengsuthiwat *et al.*, 2024).

Além disso, tratamentos de limpeza e desbaste das fibras, capazes de reduzir a presença de parênquima e o volume de lúmen, tendem a aumentar a massa específica aparente e a estabilidade dimensional, promovendo alterações na relação resistência–peso do material (Batista, 2022; Tengsuthiwat *et al.*, 2024).

## 4.2 Morfologia da fibra

A morfologia superficial da fibra de buriti, analisada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), pode ser observada na micrografia apresentada na Figura 20.

**Figura 20** - Micrografia da fibra de buriti (a-b)

Fonte: Autor, 2026

A análise morfológica da fibra de buriti por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) revela características distintas. Na seção transversal (A), observa-se a estrutura celular típica, constituída por feixes de fibrilas elementares, destacados pelo círculo azul, que circundam o lúmen central, que é o canal responsável pelo transporte de nutrientes na planta. Já na vista longitudinal (B), a fibra exibe superfície com topografia rugosa e irregular, apresentando estrias, ranhuras e falhas identificadas pelos círculos vermelhos.

Essas observações são descritas por estudos sobre a fibra de buriti e são confirmadas por investigações morfológico-estruturais, cujas micrografias detalham a presença de fibrilas agrupadas, lumens bem definidos e rugosidade de superfície que varia conforme a região do pecíolo e o método de extração (Salgado, 2014; Demosthenes *et al.*, 2020).

A rugosidade superficial, característica intrínseca de muitas fibras lignocelulósicas, desempenha papel determinante no desempenho de compósitos: uma superfície irregular aumenta a área de contato e promove ancoragem mecânica entre fibra e matriz, favorecendo a transferência de tensão na interface (Pickering; Efendy; Le, 2016; Elfaleh *et al.*, 2023).

Contudo, heterogeneidades e defeitos superficiais também podem funcionar como concentradores de tensão e amplificar a dispersão das respostas mecânicas. Estudos sobre fibras naturais e suas aplicações em compósitos confirmam esse duplo efeito (vantagem por ancoragem mecânica vs. risco por pontos de concentração de tensão) e enfatizam que a otimização da interface combina controle morfológico (pré-tratamentos e seleção de fracionamento), compatibilizantes químicos e protocolos de processamento para reduzir a variabilidade e maximizar o desempenho mecânico (Pickering; Efendy; Le, 2016; Elfaleh *et al.*, 2023).

#### 4.2.1 Teor de umidade das fibras de buriti

A determinação do teor de umidade das fibras de buriti resultou em um valor de 11,67 %, o que indica que as amostras avaliadas apresentam um grau de higroscopicidade compatível com o comportamento esperado para fibras lignocelulósicas.

Valores próximos são relatados na literatura para fibras vegetais, onde estudos destacam que fibras naturais tendem a apresentar teores de umidade consideráveis em condições ambientais e que esse fator afeta diretamente a adesão interfacial e desempenho final do compósito (Bachchan; Das; Chaudhary, 2021; Elfaleh *et al.*, 2023).

Comparando com outras fibras, trabalhos experimentais reportam teores médios em torno de 7 % para fibra de coco pré-tratada (Hasan *et al.*, 2021). Para o próprio buriti, outras pesquisas descrevem a fibra como material de alta higroscopicidade e ressaltam a necessidade de controle do teor de umidade no processamento (Souza *et al.*, 2020; Pereira *et al.*, 2021; Santos, 2021).

Em termos práticos, o valor de 11,67 % pode ser considerado compatível com o uso em compósitos desde que sejam adotadas precauções: secagem controlada das fibras ou tratamentos superficiais para reduzir a absorção de água, medidas que são recomendadas para minimizar formação de vazios, bolhas e perda de adesão interface fibra–matriz (Bachchan; Das; Chaudhary, 2021; Hasan *et al.*, 2021).

### 4.3 Ensaios físicos dos compósitos

As propriedades físicas dos compósitos, avaliadas em função da variação no teor de reforço, estão resumidas na Tabela 2. A Tabela 2 apresenta os valores médios de Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA) e Massa Específica Aparente (MEA) para cada uma das composições estudadas.

**Tabela 2 - Ensaios Físicos (AA, PA e MEA)**

<b>Proporção</b>	<b>AA (%)</b>	<b>PA (%)</b>	<b>MEA (g/cm<sup>3</sup>)</b>
0%	<b>2,082</b> (±0,77)	<b>2,438</b> (±0,90)	<b>1,166</b> (±0,01)
1%	<b>4,961</b> (±0,82)	<b>5,565</b> (±0,84)	<b>1,120</b> (±0,01)
3%	<b>5,016</b> (±0,35)	<b>5,654</b> (±0,38)	<b>1,124</b> (±0,01)
5%	<b>6,120</b> (±0,73)	<b>6,637</b> (±0,71)	<b>1,083</b> (±0,02)
7%	<b>7,881</b> (±0,69)	<b>8,428</b> (±0,61)	<b>1,054</b> (±0,02)

**Fonte:** Autor, 2026

Os dados da Tabela 2 demonstram que a adição de fibras de buriti resultou em um aumento progressivo de AA e PA. Esse resultado está diretamente relacionado à natureza

hidrofílica do reforço lignocelulósico, cuja celulose é rica em grupos polares que formam ligações de hidrogênio com a água. Um maior teor de fibra, portanto, aumenta o número de sítios disponíveis para a absorção de umidade. Adicionalmente, a incompatibilidade entre a fibra polar e a matriz de poliéster apolar (hidrofóbica) tende a prejudicar a adesão interfacial, o que pode levar à formação de vazios que elevam a porosidade e facilitam a difusão de água para o interior do compósito, comportamento detalhado em revisões sobre absorção de água e degradação em compósitos lignocelulósicos (Dhakal; Zhang; Richardson, 2007; Sanjeevi *et al.*, 2021).

Observa-se na Tabela 2 um comportamento inverso para a Massa Específica Aparente (MEA), que diminui progressivamente à medida que a fração de fibra no compósito é aumentada. Este resultado é consistente com a literatura e está associado, primeiramente, à menor massa específica da fibra de buriti em comparação com a da resina poliéster. A substituição de um volume de matriz (mais densa) por um volume equivalente de reforço (mais leve) resulta na redução da densidade do compósito. Adicionalmente, o aumento da porosidade interfacial com o acréscimo de fibras, discutido anteriormente, amplifica essa tendência de diminuição da massa específica aparente (Mylsamy; Rajendran, 2011; Guimarães *et al.*, 2021).

A validação estatística dos ensaios físicos iniciou-se pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk, que confirmou a distribuição normal dos dados para Absorção de Água, Porosidade e Massa Específica ( $p > 0,05$ ), legitimando o uso de testes paramétricos. A Análise de Variância (ANOVA) revelou uma influência altamente significativa da adição de fibras em todas as propriedades: Absorção de Água ( $F = 38,42$ ;  $p < 0,001$ ), Porosidade Aparente ( $F = 37,20$ ;  $p < 0,001$ ) e Massa Específica Aparente ( $F = 28,33$ ;  $p < 0,001$ ).

O teste de comparações múltiplas de Tukey detalhou essas variações. Para a Absorção de Água e Porosidade, a matriz plena (0%) diferiu estatisticamente de todos os compósitos ( $p < 0,001$  em ambos os casos), confirmando que a simples presença da fibra altera a integridade hermética da matriz. Destaca-se o teor de 7%, que se isolou estatisticamente com as maiores médias, diferindo significativamente até do grupo de 5% ( $p \cong 0,01$  para absorção e  $p \cong 0,02$  para porosidade). Já para a Massa Específica, a redução de densidade foi estatisticamente comprovada: a matriz plena ( $1,16 \text{ g/cm}^3$ ) difere de todos os compósitos com fibras ( $p < 0,01$ ), e o teor de 7% ( $1,05 \text{ g/cm}^3$ ) confirmou-se como o material mais leve, apresentando diferença significativa em relação aos teores de 1% e 3% ( $p < 0,05$ ).

## 4.4 Ensaios mecânicos

### 4.4.1 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram conduzidos em conformidade com a norma ASTM D638 para todas as formulações de compósitos analisadas. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos para o limite de resistência à tração, módulo de elasticidade, força máxima e deformação na ruptura (alongamento).

**Tabela 3** - Dados obtidos no ensaio de tração

<b>Composição</b>	<b>Força máxima (kN)</b>	<b>Limite de resistência (MPa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>	<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>
<b>0% Fibra de buriti</b>	<b>1,095</b> ( $\pm 0,16$ )	<b>33,832</b> ( $\pm 3,69$ )	<b>10,031</b> ( $\pm 3,04$ )	<b>0,53</b> ( $\pm 0,20$ )
<b>1% Fibra de buriti</b>	<b>0,861</b> ( $\pm 0,15$ )	<b>27,494</b> ( $\pm 3,86$ )	<b>5,911</b> ( $\pm 0,79$ )	<b>0,702</b> ( $\pm 0,25$ )
<b>3% Fibra de buriti</b>	<b>0,976</b> ( $\pm 0,18$ )	<b>25,871</b> ( $\pm 2,59$ )	<b>5,647</b> ( $\pm 0,73$ )	<b>0,616</b> ( $\pm 0,22$ )
<b>5% Fibra de buriti</b>	<b>0,923</b> ( $\pm 0,12$ )	<b>28,582</b> ( $\pm 3,60$ )	<b>7,382</b> ( $\pm 0,82$ )	<b>0,328</b> ( $\pm 0,07$ )
<b>7% Fibra de buriti</b>	<b>1,096</b> ( $\pm 0,16$ )	<b>31,334</b> ( $\pm 3,75$ )	<b>7,774</b> ( $\pm 1,06$ )	<b>0,663</b> ( $\pm 0,29$ )

Fonte: Autor, 2026

A análise dos resultados, apresentados na Tabela 3, mostra um comportamento não linear, com a resistência inicialmente diminuindo nos compósitos com 1% e 3% de fibras, mas apresentando recuperação nos compósitos com 5% e 7% de fibras, isso revela a influência significativa da adição de fibras de buriti nas propriedades mecânicas do compósito.

Observa-se um aumento notável no Módulo de Elasticidade em algumas composições, como a de 1% de fibra, que apresentou um valor de 0,702 GPa, superior ao da matriz plena (0,53 GPa). Isso indica que a incorporação das fibras, mesmo em baixa concentração, é eficaz em conferir maior rigidez ao material. Com relação ao Limite de Resistência à Tração (LRT), é interessante notar que o compósito com 7% de fibra alcançou 31,334 MPa, um valor próximo ao da resina plena (33,832 MPa), demonstrando a capacidade do material em suportar cargas significativas.

A redução na capacidade de alongamento, observada em todas as composições com

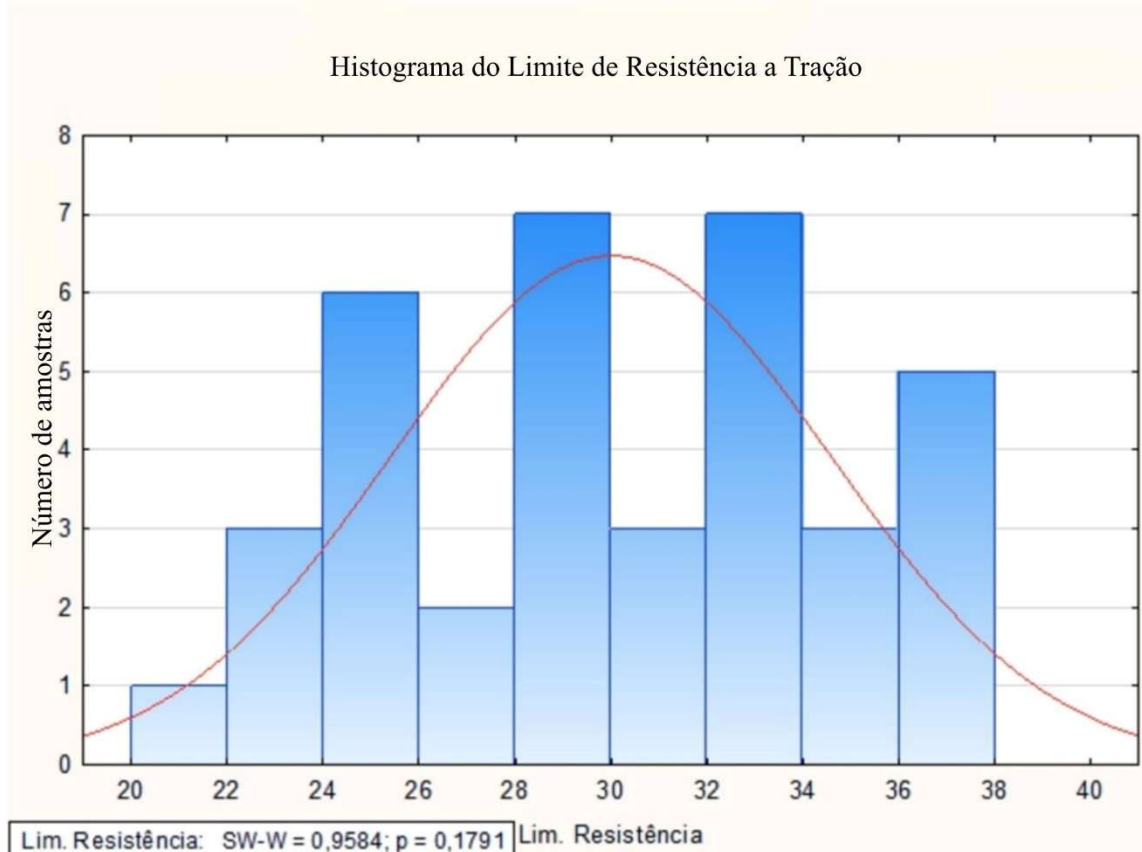
fibra, é comportamento coerente e esperado concomitantemente ao aumento da rigidez do sistema. A incorporação de fibras naturais atua restringindo a deformação plástica da matriz. As fibras, por serem elementos de maior módulo, suportam parte da carga e interrompem a deformação contínua da resina, o que resulta em menor alongamento até a fratura. Além disso, fatores como orientação das fibras, qualidade da dispersão e adesão interfacial influenciam diretamente a diminuição na maleabilidade: compósitos com má adesão fibra-matriz ou com agregação de fibras tendem a romper mais cedo e com menor deformação, enquanto tratamentos e otimização da interface podem atenuar essa perda de alongamento (Ku *et al.*, 2011; Pereira *et al.*, 2021).

A análise dos ensaios indica que, apesar de não ter ocorrido ganho consistente no LRT, a incorporação de fibras de buriti aumentou a rigidez em concentrações baixas e reduziu a massa específica do compósito. Esses achados sugerem que, enquanto as fibras não atuam como reforço eficiente nas condições experimentais testadas, elas podem ser utilizadas como carga de enchimento funcional, diminuindo o custo e a densidade do material, fornecendo conteúdo bio-baseado e melhorando o módulo à custa de ductilidade (Pereira *et al.*, 2021; Guimarães *et al.*, 2021).

Além disso, quando processadas e fracionadas adequadamente (controle de comprimento, secagem e compatibilização), as fibras podem contribuir para propriedades úteis, conferindo estabilidade dimensional, isolamento térmico/energético e melhorando aspectos superficiais sem a exigência de desempenho estrutural elevado. Desse modo, sua aplicação como enchimento orientado para peças não-estruturais ou para componentes de baixa exigência mecânica é tecnicamente viável e economicamente atraente (Pereira *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2020).

Para avaliar a influência do teor de fibra de buriti (0%, 1%, 3%, 5% e 7%) sobre o limite de resistência à tração dos compósitos realizou-se inicialmente a verificação da normalidade dos dados, condição premissa para a aplicação de testes paramétricos.

A Figura 21 mostra o histograma da distribuição dos dados de resistência à tração, juntamente com o resultado do teste de normalidade de Shapiro-Wilk.

**Figura 21** - Histograma e teste de normalidade para o limite de resistência a tração

Fonte: Autor, 2026

O teste de Shapiro-Wilk apresentou um valor de  $W = 0,9584$  e um valor de probabilidade  $p = 0,1791$ . Considerando o nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ), como o valor  $p$  obtido é superior a 0,05, não se rejeita a hipótese nula. Portanto, conclui-se que os dados seguem uma distribuição normal, validando a utilização da Análise de Variância (ANOVA).

A análise de variância indicou uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos ( $F = 6,90$ ;  $p = 0,0004$ ). O valor  $F$  é a razão entre o efeito do tratamento e o erro experimental. O valor de 6,9 indica que a influência da porcentagem de fibra na resistência é quase 7 vezes superior à variabilidade natural do processo de ensaio. Embora a Análise de Variância (ANOVA) tenha confirmado a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os grupos ( $p < 0,05$ ), este teste é global e não identifica especificamente quais teores de fibra diferem entre si. A ANOVA rejeita a hipótese de que todas as médias são iguais, mas não aponta onde residem as desigualdades.

Desta forma, para realizar uma comparação par a par entre as médias dos diferentes tratamentos (0%, 1%, 3%, 5% e 7%) e identificar isoladamente a influência de cada fração volumétrica no comportamento mecânico do compósito, aplicou-se o teste de comparações múltiplas de Tukey (HSD - *Honest Significant Difference*). Os resultados detalhados desta

comparação são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4** - Teste de Tukey (HSD) para comparação de médias do limite de resistência

	0%	1%	3%	5%	7%
0%		0,00692	0,000623	0,0692	0,597
1%	0,006923		0,911	0,984	0,277
3%	0,000623	0,9106		0,690	0,0509
5%	0,0692	0,984	0,690		0,678
7%	0,597	0,277	0,0509	0,678	

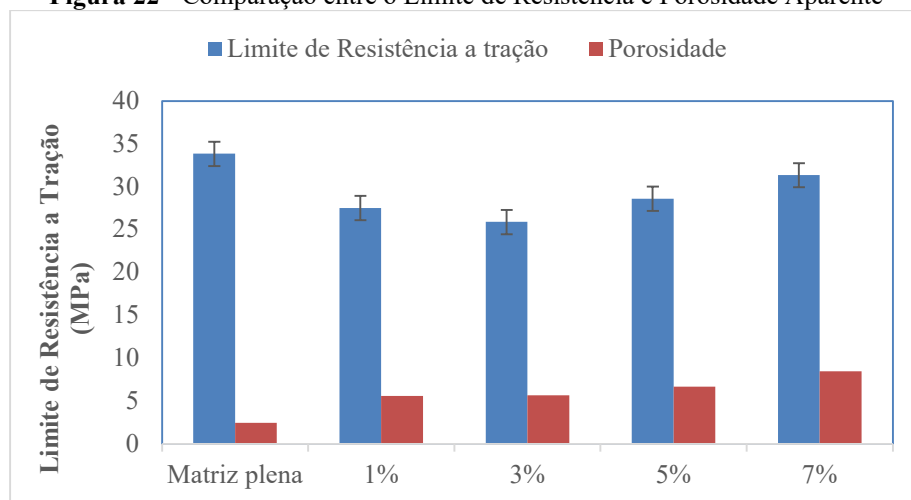
Fonte: Autor, 2026

Observa-se que a matriz plena (0% de fibra) apresentou desempenho estatisticamente superior aos compósitos reforçados com 1% ( $p = 0,00692$ ) e 3% ( $p = 0,000623$ ) de fibra de buriti.

Entretanto, ao aumentar o teor de reforço para 5% e 7%, notou-se que o teste de Tukey demonstrou que não há diferença estatística significativa ( $p > 0,05$ ) entre a matriz plena (0%) e os compósitos com 5% e 7% de fibra.

A Figura 22 mostra um gráfico que relaciona o limite de resistência e a porosidade aparente das fibras.

**Figura 22** - Comparação entre o Limite de Resistência e Porosidade Aparente



Fonte: Autor, 2026

Na Figura 22 é visível o aumento de porosidade de acordo com o aumento do percentual de fibras. Essa porosidade pode influenciar em concentradores de tensão, que podem causar fragilidades, influenciando diretamente na resistência a tração final desses compósitos. Esse comportamento é explicado pela formação de vazios e zonas pouco impregnadas. Esses vazios funcionam como concentradores locais de tensão e reduzem a área

efetiva de transferência de carga, promovendo nucleação e propagação de trincas que diminuem a resistência última do compósito (Madueke *et al.*, 2022)

A Tabela 5 a seguir exibe dados comparativos entre valores de LRT de compósitos reforçados com fibras longas de buriti neste trabalho e de outros compósitos reforçados com fibras alongadas presentes na literatura.

**Tabela 5** - Limites de resistência a Tração em comparações com outros trabalhos

<b>Composição</b>	<b>Limite de Resistência (MPa)</b>	<b>Referência</b>
<b>5% Fibra de buriti</b>	<b>28,582 (<math>\pm 3,60</math>)</b>	<b>Este trabalho</b>
<b>7% Fibra de buriti</b>	<b>31,334 (<math>\pm 3,75</math>)</b>	<b>Este trabalho</b>
5% Fibra de juta	23,88 ( $\pm 4,22$ )	Ribeiro <i>et al.</i> , 2022
5% Fibra de malva	17,93 ( $\pm 3,20$ )	Ribeiro <i>et al.</i> , 2022
10% Fibra de buriti	60,26 ( $\pm 7,88$ )	Monteiro, 2014

**Fonte:** Autor, 2026

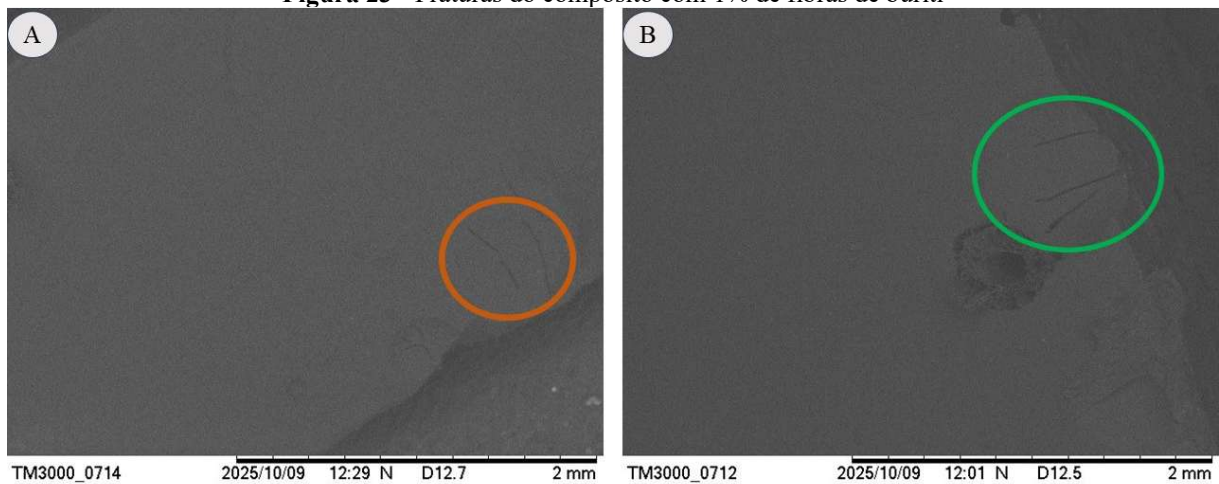
A comparação de resultados da Tabela 5 mostra que a resistência demonstrada pelos compósitos fabricados neste trabalho é superior, o que pode ser relacionado ao método de extração e fabricação, aliado ao uso do método de compressão aplicado aos materiais na fabricação.

Adicionalmente, as diferenças marcantes entre os resultados obtidos neste trabalho (5–7% de fibra) e o valor reportado para 10% de fibra de buriti podem ser explicadas pela confluência de variáveis relacionadas, ao teor volumétrico efetivo, à presença de vazios e à qualidade da adesão interfacial, todas fortemente influenciadas pelo método de extração e por tratamentos superficiais. A literatura aponta que a melhoria da adesão fibra–matriz (por exemplo, através de tratamentos químicos ou de agentes de acoplamento) e o controle de parâmetros de processamento (compressão, temperatura e tempo de cura) tendem a aumentar a resistência à tração até um limiar ótimo de carga de fibra (Kamarudin *et al.*, 2022).

Posto isto, o comparativo com os dados de compósitos fabricados com 10% de fibra de buriti coloca em evidência o potencial de reforço das fibras quando trabalhadas em percentuais maiores.

#### 4.4.1.1 Análise fractográfica

A análise fractográfica dos compósitos revela características que devem ser levadas em consideração na análise dos resultados. A Figura 23 a seguir mostra ranhuras presentes nos compósitos com 1% de fibras de buriti.

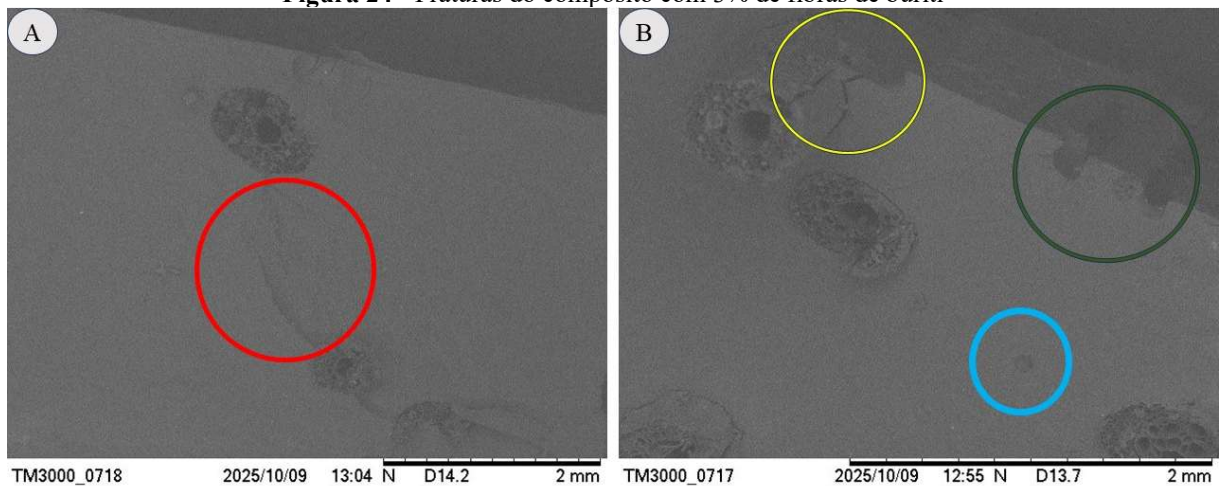
**Figura 23** - Fraturas do compósito com 1% de fibras de buriti

Fonte: Autor, 2026

A Figura 23 (A), representando o compósito com a menor resistência, apresenta uma ranhura de contorno suave na superfície de fratura (círculo laranja), sem filamentos expostos no interior do sulco; tal feição é compatível com propagação de trinca predominantemente pela matriz, associada a zonas pouco impregnadas ou a microvazios que facilitam o avanço da fissura na resina. Esse padrão costuma ocorrer quando o processo de moldagem não garante impregnação uniforme das regiões adjacentes às fibras, reduzindo a continuidade estrutural local e direcionando a fratura pela fase polimérica (Pereira *et al.*, 2021).

Na mesma Figura (B), representando o compósito com a maior resistência, no círculo verde, também se observam extremidades de fibras e sinais de ruptura ao longo da superfície, o que indica que, em certos trechos, houve transferência de carga suficiente para levar fibras à fratura em vez de simples desprendimento. A coexistência dessas áreas com outras de fratura de matriz aponta para heterogeneidade local na qualidade da interface e do empacotamento das fibras, sugerindo que algumas regiões alcançaram melhor contato fibra–matriz enquanto outras permaneceram mal impregnadas; análises comparativas entre modos de falha e condições de empacotamento descrevem essa relação entre impregnação, orientação de fibra e tipo de ruptura (Ribeiro *et al.*, 2022).

A Figura 24 apresenta a área de fratura do compósito com 3% de fibras de buriti.

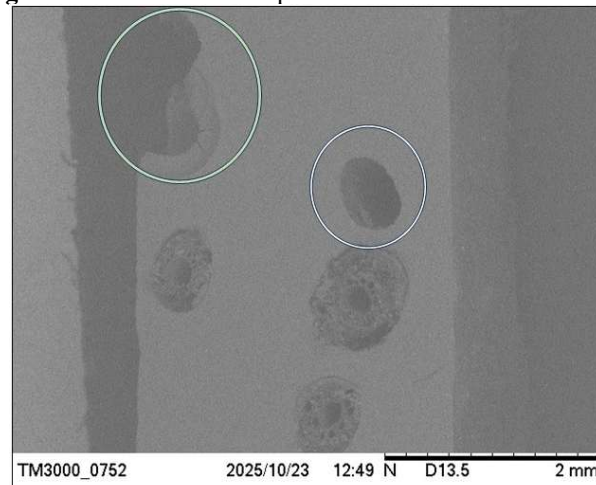
**Figura 24 - Fraturas do compósito com 3% de fibras de buriti**

Fonte: Autor, 2026

O círculo vermelho na Figura 24 (A), representando o compósito de menor resistência, mostra um sulco alongado que conecta três fibras distintas. A ausência de filamentos expostos no interior do sulco e continuidade do traço entre as regiões fibrilares é compatível com propagação de fratura ao longo de uma faixa resinosa ou de baixa impregnação entre os feixes. Essa interpretação baseia-se em observações de processo e microestrutura, que relacionam falhas por fratura de matriz a zonas pouco impregnadas, microvazios e heterogeneidades de empacotamento obtidas durante a moldagem. Nesses casos, a trinca tende a seguir a fase polimérica mais frágil e trajetos preenchidos por resina entre fibras, produzindo sulcos contínuos como o observado na Figura 23 (Pereira *et al.*, 2021).

Ainda na Figura 24 (B), representando o compósito de maior resistência, a configuração indicada (círculo amarelo: duas fraturas irradiando a partir de uma bolha; círculo verde: duas zonas vazias na borda; círculo azul-claro: bolha isolada) aponta para atuação de cavidades como concentradores locais de tensão e para perda de continuidade do material na periferia. A anatomia da fibra e problemas de impregnação favorecem a formação de bolhas e vazios, os quais funcionam como sítios de nucleação de trinca e reduzem a área efetiva de transferência de carga quadro coerente com as fraturas que irradiam de bolhas e com as zonas vazias junto à borda observadas na Figura 23 (Souza *et al.*, 2020).

A Figura 25 a seguir mostra a análise da fratura do compósito com 5% de fibra de buriti.

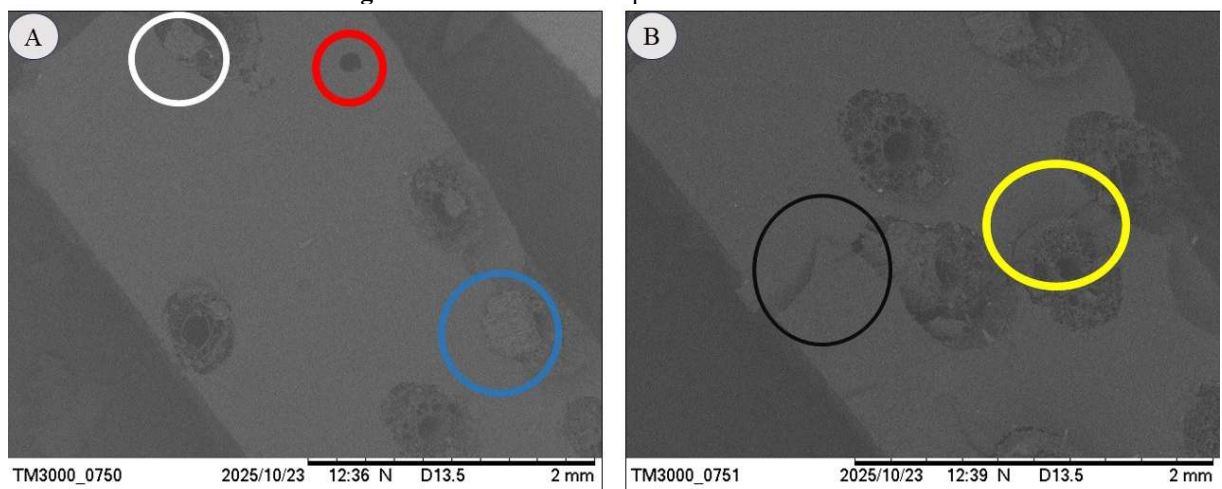
**Figura 25** - Fratura do compósito com 5% de fibras de buriti

**Fonte:** Autor, 2026

A área indicada pelo círculo superior verde claro à direita evidencia uma descontinuidade da massa poliéster junto à face do compósito. Esse aspecto é coerente com um defeito de fabricação (bolha de grande porte, delaminação superficial ou vazios) que provoca perda local da seção resistente e atua como concentrador de tensões, reduzindo a capacidade estrutural da região afetada (Pereira *et al.*, 2021).

No segundo círculo azul claro observa-se um orifício cujo interior contém fragmentos e resíduos fibrilares. Essa imagem sugere que, naquela cavidade, a matriz foi removida ou deslocada deixando restos de feixes ou fibrilas no interior, evidenciando heterogeneidade de impregnação e fragilização local que favorece nucleação de trinca e perda de continuidade do reforço (Souza *et al.*, 2020).

Por último, a Figura 26 mostra a fratura com 7% de fibras.

**Figura 26** - Fratura do compósito com 7% de fibras

**Fonte:** Autor, 2026

Na Figura 26 (A), representando o compósito com menor resistência, o círculo superior branco e o inferior azul claro indicam resíduos de fibras e resina sobre fibras impregnadas, onde observa-se material polimérico aderido à superfície dos feixes, o que sinaliza que, na fratura, parte da resina permaneceu aderida aos elementos fibrilares em vez de separar-se limpa entre fases. Essa configuração é compatível com um modo de falha em que há coesão parcial da matriz junto ao reforço em locais onde a impregnação foi relativamente satisfatória. Simultaneamente, o vazio central indicado pelo círculo vermelho age como um ponto de concentração de tensão que facilita a nucleação da trinca e reduz a continuidade do empacotamento local, explicando por que se observam regiões com resina aderida e outras com perda de material (Pereira *et al.*, 2021).

Ainda na Figura 26 (B), representando o compósito de maior resistência, é perceptível uma trinca que atravessa a amostra da borda esquerda até a borda direita, indicada pelos dois círculos (preto e amarelo), passando por três fibras. Esse comportamento sugere que naquele trajeto houve transferência de carga suficiente para envolver as fibras no processo de fratura. A crista de fratura que cruza os feixes pode corresponder a fratura por ruptura e/ou corte parcial das fibras em pontos onde a adesão local foi suficiente para transmitir esforço. Alternadamente, se o plano de fratura atravessa nitidamente as fibras, isso evidencia que a resistência intrínseca das fibras ou do conjunto fibra–matriz naquela região foi alcançada e ultrapassada (Ribeiro *et al.*, 2022).

#### 4.4.2 Ensaio de flexão

Os valores médios encontrados para resistência a flexão e alongamento dos ensaios de flexão seguindo a norma ASTM D790 são apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6** - Resultados do ensaio de flexão

<b>Composição</b>	<b>Resistência a flexão (MPa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>
<b>Matriz plena</b>	<b>92,71</b> ( $\pm 9,81$ )	<b>4,28</b> ( $\pm 1,69$ )
<b>1% Fibra de buriti</b>	<b>51,34</b> ( $\pm 13,77$ )	<b>2,33</b> ( $\pm 0,73$ )
<b>3% Fibra de buriti</b>	<b>44,76</b> ( $\pm 8,47$ )	<b>1,83</b> ( $\pm 0,33$ )
<b>5% Fibra de buriti</b>	<b>42,39</b> ( $\pm 11,13$ )	<b>1,69</b> ( $\pm 0,40$ )
<b>7% Fibra de buriti</b>	<b>60,47</b> ( $\pm 9,71$ )	<b>2,44</b> ( $\pm 0,6$ )

Fonte: Autor, 2026

A Tabela 6 evidencia que a matriz plena apresentou resistência à flexão substancialmente maior (92,71 MPa) do que a maioria das composições com adição de fibras, com exceção da amostra contendo 7% de fibra de buriti, que mostrou recuperação parcial

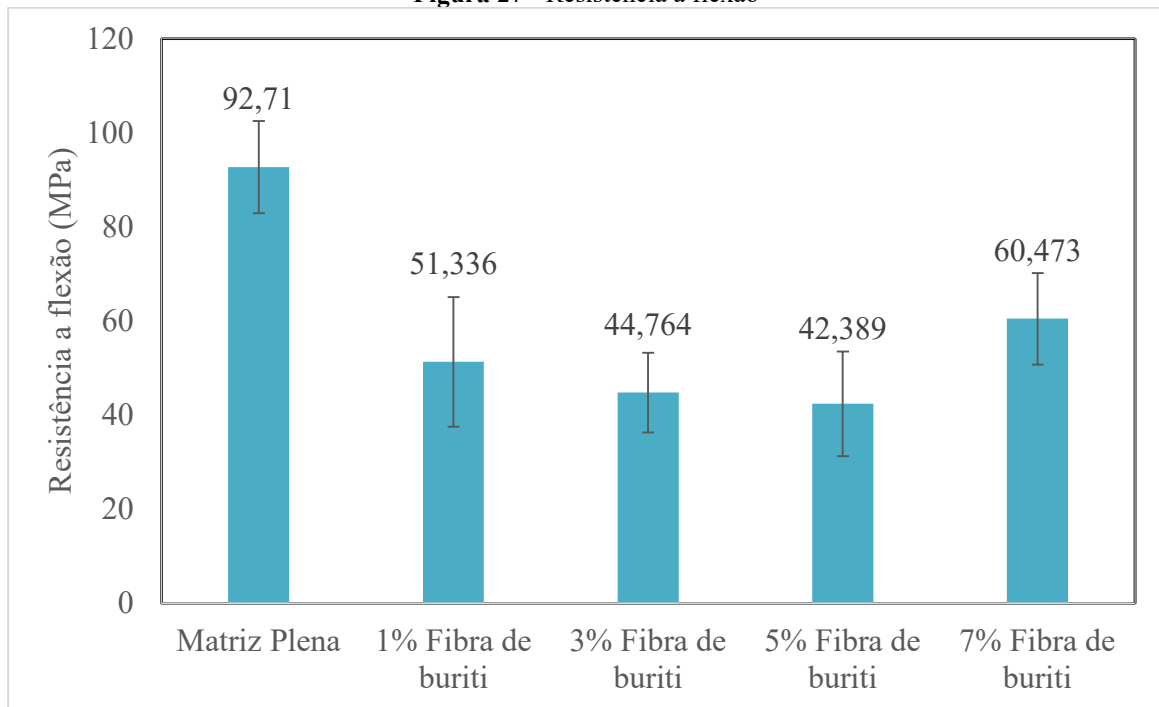
(60,47 MPa). Esse comportamento pode ser explicado por mecanismos microestruturais bem documentados. Em baixos teores de reforço, a incorporação de fibras naturais tende a aumentar a porosidade e a criar zonas de má impregnação que atuam como concentradores de tensão, reduzindo a área efetiva resistente e, conseqüentemente, a resistência última à flexão. Vazios e descontinuidade na impregnação são fatores predominantes na diminuição de resistência em compósitos não compatibilizados, especialmente quando a matriz é apolar (poliéster) e as fibras são hidrofílicas, como é o caso da fibra de buriti. A fraca adesão fibra–matriz favorece baixa adesão interfacial o que promove a falha sob flexão (Elfaleh *et al.*, 2023; Souza *et al.*, 2020).

Ademais, a elevada dispersão dos resultados (desvios-padrão apresentados na Tabela 6) corrobora a influência da variabilidade intrínseca das fibras naturais (variação de diâmetro, defeitos e comprimento) e de pequenas diferenças no processo de moldagem sobre a resistência medida (Elfaleh *et al.*, 2023).

A recuperação parcial observada na composição com 7% de fibra de buriti sugere que existe um limiar de conteúdo no qual a geometria e a distribuição das fibras começam a favorecer a transferência de carga, reduzindo o efeito de diminuição inicial e permitindo que as fibras contribuam positivamente para a rigidez e para a resistência em flexão. Estudos sobre compósitos com fibras contínuas e alinhadas mostram que, a partir de certo conteúdo volumétrico e com adequada orientação das fibras, os caminhos de carga se estabelecem e o reforço passa a tornar-se elemento estrutural efetivo (Ribeiro *et al.*, 2022).

Embora 7% não atinja o desempenho da matriz plena, o aumento em relação a 1–5% indica que a contribuição geométrica das fibras já começa a ser relevante; isso aponta também para a necessidade de intervenções no processamento (por exemplo, melhor controle da impregnação) para explorar plenamente o potencial do reforço.

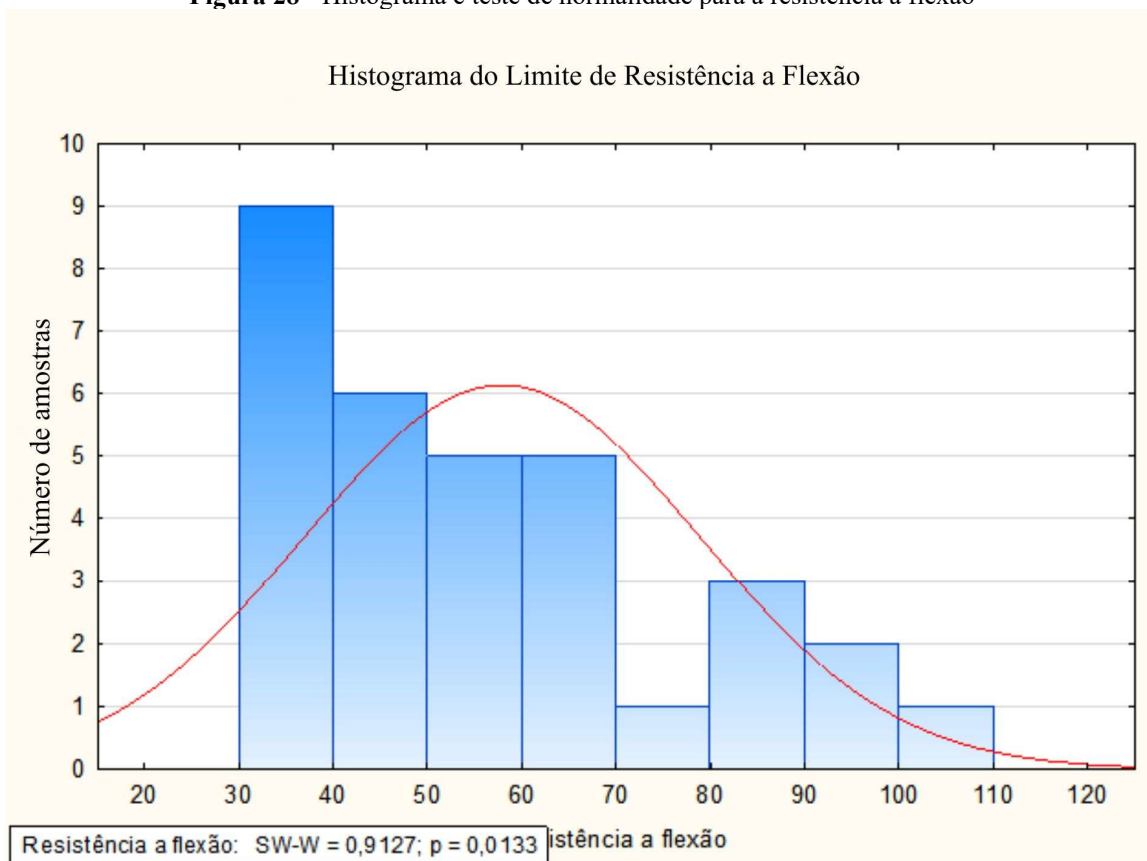
A Figura 27 a seguir mostra um comparativo entre os diferentes valores de resistência a flexão encontrados no ensaio.

**Figura 27** - Resistência a flexão

**Fonte:** Autor, 2026

A análise do gráfico reforça e complementa a interpretação numérica da Tabela 6: visualmente observa-se a diminuição inicial seguida de recuperação parcial, mas as barras de erro evidenciam sobreposições importantes entre algumas médias, o que implica que certas diferenças podem não ser estatisticamente significativas sem aplicação de testes inferenciais. A literatura recomenda cautela na atribuição de efeitos positivos quando há sobreposição das barras de erro e sugere o uso de técnicas de moldagem assistida por vácuo ou de compactação para reduzir a porosidade e a variabilidade amostral, práticas que, quando implementadas, tendem a elevar as médias e reduzir o desvio entre réplicas (Guimarães *et al.*, 2021; Elfaleh *et al.*, 2023).

Para avaliar a influência do teor de fibra de buriti (0%, 1%, 3%, 5% e 7%) sobre o limite de resistência à flexão dos compósitos, realizou-se inicialmente a verificação da normalidade dos dados, condição premissa para a escolha do método estatístico adequado.

**Figura 28** - Histograma e teste de normalidade para a resistência a flexão

**Fonte:** Autor, 2026

O teste de Shapiro-Wilk apresentou um valor de  $W = 0,9127$  e um valor de probabilidade  $p = 0,0133$ . Considerando o nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ), como o valor  $p$  obtido é inferior a 0,05, rejeita-se a hipótese nula de normalidade. Portanto, conclui-se que os dados não seguem uma distribuição normal, inviabilizando a utilização da ANOVA paramétrica e exigindo a aplicação do teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis.

O teste de Kruskal-Wallis indicou uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos ( $H = 19,90$ ;  $p = 0,0005$ ). O valor  $H$  é a estatística de teste baseada nos postos (rankings) dos dados. O valor de 19,90 associado a um  $p$  muito baixo indica que a distribuição dos postos de resistência varia significativamente entre os diferentes teores de fibra, ou seja, a mediana da resistência é influenciada pela adição do reforço.

Embora o teste de Kruskal-Wallis tenha confirmado a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os grupos ( $p < 0,05$ ), este teste é global e não identifica especificamente quais teores de fibra diferem entre si. O teste rejeita a hipótese de que todos os grupos provêm da mesma população, mas não aponta onde residem as desigualdades.

Desta forma, para realizar uma comparação par a par entre os diferentes tratamentos (0%, 1%, 3%, 5% e 7%) e identificar isoladamente a influência de cada fração volumétrica no

comportamento mecânico do compósito, aplicou-se o teste de comparações múltiplas de médias dos postos. Os resultados detalhados desta comparação (p - values bicaudais) são apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7** - Valores de p para o teste de Kruskal - Wallis na resistência a flexão

	0%	1%	3%	5%	7%
0%		0,0785	0,00258	0,00107	0,730
1%	0,0785		1,000	1,000	1,000
3%	0,00258	1,000		1,000	0,527
5%	0,00107	1,000	1,000		0,304
7%	0,730	1,000	0,527	0,304	

Fonte: Autor, 2026

Observa-se que a matriz plena (0% de fibra) apresentou desempenho estatisticamente superior aos compósitos reforçados com 3% ( $p = 0,00258$ ) e 5% ( $p = 0,00107$ ) de fibra de buriti. Diferente do ensaio de tração, a adição de 1% de fibra não apresentou diferença estatística significativa em relação à matriz plena ( $p = 0,078$ ), situando-se no limiar de significância. Adicionalmente, ao avaliar o teor de 7%, notou-se que o teste de comparações múltiplas demonstrou que não há diferença estatística significativa ( $p > 0,05$ ) entre a matriz plena (0%) e os compósitos com 7% de fibra, sugerindo uma recuperação das propriedades de flexão neste teor de reforço.

A Tabela 8 a seguir exhibe dados comparativos entre valores de Limite de resistência a flexão de compósitos reforçados com fibras longas de buriti neste trabalho e de outros compósitos reforçados com fibras alongadas presentes na literatura.

**Tabela 8** - Limite de resistência a flexão em comparação com outras literaturas

Composição	Resistência a flexão (MPa)	Referência
<b>7% Fibra de buriti</b>	<b>60,47 (<math>\pm 9,71</math>)</b>	<b>Este trabalho</b>
10% Fibra de sisal	48,90 ( $\pm 1,20$ )	Allam <i>et al.</i> , 2024
20% Fibra de coco	31,80 ( $\pm 1,40$ )	Rout <i>et al.</i> , 2001

Fonte: Autor, 2026

A comparação dos resultados mostra que a resistência demonstrada pelas fibras de buriti é superior a outras encontradas de maneira comum na literatura, o que deixa em evidência o enorme potencial dessas fibras quando trabalhadas como carga de enchimento, além do potencial latente para o reforço efetivo.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho atingiu seu objetivo geral ao produzir e caracterizar, física e mecanicamente os compósitos. Os resultados obtidos confirmam a viabilidade técnica da utilização das fibras de buriti como reforço em compósitos poliméricos, demonstrando que a incorporação da fibra altera significativamente as propriedades da matriz plena, agregando valor a um recurso natural abundante na região.

As fibras de buriti foram caracterizadas (massa específica aparente média =  $0,489 \pm 0,03 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; teor de umidade = 11,67 %) e incorporadas em matriz poliéster ortoftálica em frações mássicas de 0%, 1%, 3%, 5% e 7% para avaliação das propriedades físico-mecânicas.

A introdução das fibras resultou em aumento sistemático da absorção de água (AA) e da porosidade aparente (PA) com o aumento do teor de reforço, enquanto a massa específica aparente do compósito diminuiu, evidenciando ganho de leveza por substituição mássica da matriz por fibras de menor densidade.

Nos ensaios de tração observou-se comportamento não linear. O Limite de Resistência à Tração (LRT) decresceu nos teores iniciais (0% = 33,832 MPa; 1% = 27,494 MPa; 3% = 25,871 MPa), apresentou recuperação parcial em 5% (28,582 MPa) e alcançou valor estatisticamente próximo ao da matriz plena em 7% (31,334 MPa). O módulo de elasticidade mostrou variações dependentes da composição (1% = 0,702 GPa > matriz 0,53 GPa), enquanto o alongamento à ruptura reduziu em todas as misturas com fibra, compatível com aumento global da rigidez e redução da maleabilidade.

A análise fractográfica revelou predominância de modos de falha controlados pela matriz em regiões pouco impregnadas, presença de vazios, bolhas e falhas de adesão interfacial, bem como zonas onde houve ruptura fibrilar, o que confirma que a heterogeneidade de impregnação e a porosidade são os fatores limitantes ao aproveitamento pleno do potencial reforçador das fibras de buriti.

Em síntese, as fibras se mostraram efetivas como carga de enchimento funcional (ganho de leveza e apelo sustentável) e demonstraram potencial de contribuição mecânica nas condições de processamento empregadas. A transição observada a partir de 5–7% indica que, sob controle de porosidade e interface, é possível recuperar boa parte do desempenho mecânico da matriz.

### 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Investigar arquiteturas e orientações diferentes para o reforço, ampliar a faixa de frações de reforço controladas, utilizando as melhorias de processo propostas, para identificar o limiar ótimo

de fibras em que o efeito de enchimento se torne reforçador.

Avaliar ensaios de envelhecimento higrotérmico e cíclico para estimar a durabilidade dos compósitos e o papel dos tratamentos superficiais na estabilidade dimensional e mecânica.

Caracterizar mecanicamente a fibra isolada e medir propriedades térmicas das fibras tratadas e não tratada.

## REFERÊNCIAS

ALAO, P. F. et al. Effect of Hemp Fiber Surface Treatment on the Moisture/Water Resistance and Reaction to Fire of Reinforced PLA Composites. **Materials**, [S. l.], v. 14, n. 16, p. 4380, 2021.

ALLAM, T. et al. Experimental study on mechanical performance and microstructural characterization of optimized sisal fiber reinforced polyester composites. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 14, n. 1, art. 3062, 2024.

ASTM D 2734 – **Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics**. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2009.

ASTM D 570 – **Standard Test Method for Water Absorption of Plastics**. **Annual Book of ASTM Standards**, American Society for Testing and Materials, 1998.

ASTM D 638-14, **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

ASTM D 790 – **Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2017.

ASTM D 792 – **Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement**. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2008.

ARQUIMI. **Tipos de resinas poliéster e suas aplicações**. 2020. Disponível em: <https://arquimi.com.br/blog/tipos-de-resinas-poliester>. Acesso em: 11 out. 2025.

ASHRITH, H. S.; JEEVAN, T. P.; XU, J. A review on the fabrication and mechanical characterization of fibrous composites for engineering applications. **Journal of Composites Science**, Basel, v. 7, n. 6, p. 252, 2023.

ASSAF, I.; BELKHEIR, M. Effect of fiber-matrix interface decohesion on the behavior of thermoset and thermoplastic composites reinforced with natural fibers: A comparative study. **Materials Science (Medžiagotyra)**, [S. l.], v. 28, n. 1, p. 55-62, 2022.

BACHCHAN, A. A.; DAS, P. P.; CHAUDHARY, V. Effect of moisture absorption on the properties of natural fiber reinforced polymer composites: a review. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], 2021.

BAKELITE. In: **Encyclopaedia Britannica**. [S. l.], s.d. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/Bakelite>. Acesso em: 06 out. 2025.

BALLESTEROS, L. F.; TEIXEIRA, J. H.; RAMIREZ, J. H. S. Influência do tratamento alcalino nas propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno reforçados com fibra de casca de coco verde. **Polímeros**, [S. l.], v. 29, n. 2, e2018042, 2019.

BARAKAT, A. et al. Development of a Cure Model for Unsaturated Polyester Resin Systems Based on Processing Conditions. **Polymers**, [S. l.], v. 16, n. 17, p. 2391, 2024.

BARBOSA, A. P. **Características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de buriti**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) — Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2011.

BARROS, M. A.; SILVA, R. A.; LIMA, J. R. Compósitos reforçados com fibras: tipos e aplicações. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 3, p. 28–36, 2005.

BASTOS, C. M. et al. Reforço de argamassas com fibras naturais tratadas: desempenho mecânico e durabilidade. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 4, e12463, 2019.

BATISTA, A. S. **Bioespuma do buritizeiro (*Mauritia flexuosa*) para composição do núcleo de painéis estruturais de isolamento**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2022.

BHUVANESWARI, V. et al. A Critical Review on Hygrothermal and Sound Absorption Behavior of Natural-Fiber-Reinforced Polymer Composites. **Polymers**, [S. l.], v. 14, n. 21, p. 4727, 2022.

BORGES, A. L. et al. Mechanical behavior of jute fiber composites: effect of fiber orientation. **Materials Research**, [S. l.], v. 28, n. 2, e20250013, 2025.

CALLISTER Jr., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

CÂNDIDO, L. M.; BARROS, A. R.; TAVARES, R. R. Interfaces em compósitos poliméricos reforçados com fibras. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, [S. l.], v. 10, n. 4, p. 211–218, 2000.

CATTANI, M. L. Caracterização de fibras lignocelulósicas amazônicas. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 45, n. 2, p. 99–108, 2015.

CLEMENT, C. R. et al. Socio-biodiversity value chains: A definition and a review of the main concepts. **Socio-biodiversity Value Chains in the Amazon**, [S. l.], p. 1-15, 2024.

COMPOSITES WORLD. **Unsaturated polyester resins: types and applications**. 2020. Disponível em: <https://www.compositesworld.com>. Acesso em: 18 out. 2025.

CORREIA, C. A. et al. Compósitos termoplásticos com madeira. **Polímeros**, [S. l.], v. 13, n. 3, p. 154–165, 2003.

CUNHA, F. R.; REZENDE, M. C.; COSTA, M. L. Efeitos higrotérmicos em compósitos poliméricos estruturais. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, [S. l.], v. 16, n. 4, p. 254–261, 2006.

DA SILVEIRA, P. H. P. M.; CARDOSO, B. F. D. A. F.; MARCHI, B. Z.; MONTEIRO, S. N. Amazon Natural Fibers for Application in Engineering Composites and Sustainable

Actions: A Review. **Eng**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 133–179, 2024.

DEMOSTHENES, L. F. et al. Thermal and mechanical characterization of lignocellulosic fibers for composite reinforcement. **Journal of Renewable Materials**, [S. l.], v. 8, n. 5, p. 471–482, 2020.

DHAKAL, H. N.; ZHANG, Z. Y.; RICHARDSON, M. O. W. Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. **Composites Science and Technology**, [S. l.], v. 67, n. 7–8, p. 1674–1683, 2007.

DINIZ, J. F. B. et al. Vegetable Fiber Drying: Theory, Advanced Modeling and Application. In: LIMA, M. S. S. de; ALMEIDA, A. K. S. C. de; SILVA, F. de A. A. C. da (Ed.). **Drying of Vegetable Fibers**. Cham: Springer, 2021. p. 31–60.

ELEUTÉRIO, T.; TROTA, M. J.; MEIRELLES, M. G.; VASCONCELOS, H. C. A Review of Natural Fibers: Classification, Composition, Extraction, Treatments, and Applications. **Fibers**, [S. l.], v. 13, n. 9, art. 119, 2025.

ELFALEH, I. et al. A comprehensive review of natural fibers and their applications. **Journal of Natural Fibers**, [S. l.], 2023.

FARUK, O.; BLEDZKI, A. K.; FINK, H. P.; SAIN, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. **Progress in Polymer Science**, [S. l.], v. 37, n. 11, p. 1552–1596, 2012.

FERNANDES, J. F. **Compósitos poliméricos com fibras de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.): caracterizações físicas, de resistência à chama e mecânicas**. 2025. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2025.

FREIRES, A. M. et al. Mechanical properties and statistical analysis of polyester composite reinforced with miriti fibers braided using crochet technique. **Journal of Materials Research and Technology**, [S. l.], v. 28, p. 4392–4400, 2024.

FUNDO AMAZÔNIA; ISPN. **Manual de aproveitamento integral do buriti**. [S. l.], [s.d.]. GAMA, M. A.; COSTA, F. E.; JÚNIOR, P. R. Fibras sintéticas e compósitos: panorama atual e perspectivas. **Polímeros**, [S. l.], v. 29, n. 1, e2020012, 2019.

GODOY, F. D. **Proposta de reaproveitamento do pseudocaule da bananeira**. São Caetano do Sul: CEUN-EEM, 2010.

GOMES, S. S. **Processos de materiais compósitos de matriz polimérica para aplicações em aeronaves**. São Paulo: Faculdade de Tecnologia de São Paulo, 2020.

GUIMARÃES, M. G. et al. Green energy technology from buriti (*Mauritia flexuosa* L. f.) for Brazilian agro-extractive communities. **SN Applied Sciences**, [S. l.], v. 3, art. 283, 2021.

HASAN, K. M. F. et al. Thermo-mechanical properties of pretreated coir fiber and characterization: implications for composite processing. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 11, 2021.

ILO — INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION; CIRCLE ECONOMY; WORLD BANK GROUP. **Measuring and modelling circular jobs: definitions and methods** — technical review. 2024.

ISHIZAKI, M. H. et al. **Biocomposites Reinforced with Natural Fibers: a Review**. 2006.

JAMBECK, J. R.; WALKER, I. The impacts of plastics' life cycle. **One Earth**, [S. l.], v. 6, n. 6, p. 600-606, 2023.

JIJU, P. S. et al. Sustainability through lignin valorization: recent innovations. **Bioresources and Bioprocessing**, [S. l.], 2025.

KAMARUDIN, S. H. et al. A review on natural fiber reinforced polymer composites (NFRPC) for sustainable industrial applications. **Polymers**, [S. l.], v. 14, n. 17, art. 3698, 2022.

KANDEMIR, A.; POZEGIĆ, T. R.; HAMERTON, I.; EICHHORN, S. J.; LONGANA, M. L. Characterisation of natural fibres for sustainable discontinuous fibre composite materials. **Materials**, [S. l.], v. 13, n. 9, art. 2129, 2020.

KU, H. et al. A review on the mechanical properties of natural fiber reinforced polymer composites. **Composites Part B: Engineering**, [S. l.], v. 42, n. 4, p. 856–873, 2011.

LAVORATTI, A. et al. Thermal stability and degradation behavior of lignocellulosic fibers. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [S. l.], v. 104, n. 3, p. 1005–1010, 2011.

LEÃO, A. L.; LEITE, A. S. Potencialidades do Buriti (*Mauritia flexuosa* L.) na Amazônia. In: **Recursos Florestais da Amazônia: potencialidades e desafios**. Manaus: INPA, 2020. p. 115–134.

LEITE-BARBOSA, A. C. et al. Avaliação tecnológica e socioeconômica da cadeia produtiva do buriti na Amazônia. **Revista Agroecossistemas**, Belém, v. 16, n. 2, p. 1–14, 2024.

LEWIS, O. et al. A Review on the Modelling of Aligned Discontinuous Fibre Composites. **Journal of Composites Science**, [S. l.], v. 8, n. 8, p. 318, 2024.

LIU, L. et al. Recent advances in interface microscopic characterization of polymer composites. **Frontiers in Materials**, [S. l.], 2023.

MADUEKE, C. I.; MBAH, O. M.; UMUNAKWE, R. A. A review on the limitations of natural fibres and natural fibre composites with emphasis on tensile strength using coir as a case study. **Polymer Bulletin**, [S. l.], v. 80, p. 3489–3506, 2022.

MARINUCCI, G. **Materiais compósitos estruturais**. Rio de Janeiro: IBP, 2006.

MAROM, G. The Biomimetic Evolution of Composite Materials: From Straw Bricks to Engineering Structures and Nanocomposites. **Journal of Composites Science**, [S. l.], v. 5, n. 5, p. 123, 2021.

MERLINI, C. **Ciência e tecnologia de compósitos poliméricos**. 1. ed. Blumenau: Artliber, 2021.

MIRANDA, L. F. et al. Surface modification of lignocellulosic fibers for composites. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 426–435, 2015.

MONTEIRO, M. V. F. **Análise da propriedade mecânica de tração e resistência à chama de compósitos poliméricos com fibras de Envira Cheirosa (*Annona paludosa* Aubl.)**. 2025. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2025.

MONTEIRO, S. N. et al. Tensile Strength of Polyester Composites Reinforced with Thinner Buriti Fibers. **Materials Science Forum**, [S. l.], v. 775–776, p. 183–188, 2014.

MONTOYA-BERRIO, J. et al. Influence of drying temperature on the properties of Colombian banana fibers for its potential use as reinforcement in composite materials. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 14, art. 25180, 2024.

MORDOR INTELLIGENCE. **Mercado de material compósito: crescimento, tendências, impacto do COVID-19 e previsões (2024–2029)**. 2024. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com>. Acesso em: 05 out. 2025.

MUÑOZ-BLANDÓN, O. et al. Exploring the potential of fique fiber as a natural cellulosic fiber in composites. **Polymers**, [S. l.], v. 15, n. 12, art. 2712, 2023.

MYLSAMY, K.; RAJENDRAN, I. The mechanical properties, deformation and thermo-mechanical properties of alkali treated and untreated single yarn sansevieria ehrenbergii fibre/polyester composites. **Materials & Design**, [S. l.], v. 32, n. 6, p. 3548–3555, 2011.

NAGLIS, M. M. M.; D'ALMEIDA, J. R. M. Avaliação dos modos de falha sob impacto de compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras. **Polímeros**, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 54-61, 1998.

OBERLE, B. et al. **Global Resources Outlook 2019: Natural resources for the future we want**. International Resource Panel / UNEP, 2019.

ORNAGHI JÚNIOR, H. L. et al. Surface modification and properties of lignocellulosic fibers. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [S. l.], v. 83, p. 148–156, 2016.

PARDINI, L. C.; NETO, Z. S. **Compósitos Estruturais: tecnologia e prática**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2016.

PEREIRA, W. A. et al. Desenvolvimento de compósitos poliméricos reforçados com fibra da folha do buriti. **Matéria (Rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, v. 26, e12932, 2021.

PHIRI, R. et al. Advances in lightweight composite structures and manufacturing technologies: A comprehensive review. **Heliyon**, [S. l.], v. 10, n. 21, e39867, 2024.

PICKERING, K. L.; EFENDY, M. G. A.; LE, T. M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical properties. **Composites Part A: Applied**

**Science and Manufacturing**, [S. l.], v. 83, p. 98–112, 2016.

PINTO, M. V. S. **Análise do processo de obtenção de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de sisal e coco utilizando ferramentas da qualidade**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2018.

POLETTO, M. Compósitos termoplásticos com madeira: uma breve revisão. **Interdisciplinary Journal of Applied Science**, [S. l.], v. 4, n. 2, p. 45–53, 2017.

PRASAD, V. et al. A Comprehensive Review of Sustainability in Natural-Fiber-Reinforced Polymers. **Sustainability**, [S. l.], v. 16, n. 3, art. 1223, 2024.

REZENDE, M. C.; COSTA, M. L. **Compósitos estruturais: tecnologia e prática**. São Paulo: Artliber, 2011.

RIBEIRO, M. M. et al. Comparison of Young's Modulus of continuous and aligned lignocellulosic jute and mallow fibers reinforced polyester composites determined both experimentally and from theoretical prediction models. **Polymers**, [S. l.], v. 14, n. 3, p. 401, 2022.

ROCHA, J. S.; BESSA, T. M. F. **Aproveitamento do pecíolo de buriti (*Mauritia flexuosa*) para utilização em embalagem substituição ao papelão, madeira e isopor**. Manaus: SUFRAMA, 2002.

ROUT, J. et al. The influence of fibre treatment on the performance of coir–polyester composites. **Composites Science and Technology**, [S. l.], v. 61, n. 9, p. 1303–1310, 2001.

SABA, N.; JAWAID, M.; SULTAN, M. T. H. An overview of mechanical and physical testing of composite materials. In: **Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites**. Duxford: Woodhead Publishing, 2017. p. 1–13.

SALGADO, I. de P. **Compósitos de poliéster reforçados com fibras de buriti**. Relatório PIBIC. 2014.

SAMPAIO, P. T. B.; CARRAZZA, L. R. **Manual técnico do buriti (*Mauritia flexuosa* L. f.)**. Brasília: Embrapa, 2012.

SANJAY, M. R. et al. Characterization and properties of natural fiber polymer composites: a comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 172, p. 566–581, 2018.

SANJEEVI, S. et al. Effects of water absorption on the mechanical properties of hybrid natural fibre/phenol formaldehyde composites. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 13385, 2021.

SANTOS, F. A. et al. Caracterização de fibras de buriti (*Mauritia flexuosa*) para aplicação em compósitos poliméricos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 4, p. 1477–1485, 2013.

SANTOS, G. M. **Análise da concentração de resíduo de madeira, buriti e andiroba na**

**produção de painéis poliméricos de média densidade.** 2021. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Amazonas (UFAM), 2021.

SATYANARAYANA, K. G.; ARIZAGA, G. G. C.; WYPYCH, F. Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers – an overview. **Progress in Polymer Science**, [S. l.], v. 32, n. 8–9, p. 982–1021, 2007.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE DO ACRE (SEMA). **Relatório de Gestão 2020.** Rio Branco: SEMA, 2021.

SHARMA, A. K. Matrix materials used in composites: a comprehensive study. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 22, p. 1512–1520, 2020.

SHI, X. et al. Evaluation of CNTs and SiC Whiskers Effect on the Rheology and Mechanical Performance of Metakaolin-Based Geopolymers. **Materials**, [S. l.], v. 15, n. 17, p. 6099, 2022.

SILVA, A. A. X.; KOEHLER, B. O.; AMICO, S. C. Propriedades mecânicas de compósitos aramida/epóxi e aramida/poliéster produzidos por infusão a vácuo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 15., 2019, Bento Gonçalves. **Anais [...]**. Bento Gonçalves: ABPol, 2019.

SIQUEIRA, F. F. S. et al. Characterization of Buriti (*Mauritia flexuosa*) Foam for Thermal Insulation and Sound Absorption Applications in Buildings. **Buildings**, [S. l.], v. 11, n. 7, art. 292, 2021.

SIQUEIRA, L. P. et al. Technological use of buriti fibers in sustainable materials. **Journal of Sustainable Materials**, [S. l.], v. 3, n. 2, p. 77–90, 2021.

SOLTYS, L. M. et al. Synthesis and Properties of Silicon Carbide (Review). **Physics and Chemistry of Solid State**, [S. l.], v. 24, n. 1, p. 5–16, 2023.

SOUZA, L. M. et al. Comparação da qualidade dos tecidos do pecíolo de buriti (*Mauritia flexuosa* L. f.) para combustão e carbonização. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 30, n. 2, p. 516–531, 2020.

TENG SUTHIWAT, J. et al. Characterization of novel natural cellulose fiber from Ficus macrocarpa bark for lightweight structural composite application and its effect on chemical treatment. **Heliyon**, [S. l.], v. 10, n. 9, e30442, 2024.

VENTURA, C. E. M. **Materiais compósitos estruturais: fundamentos e aplicações.** Rio de Janeiro: IBP, 2009.

VIEIRA, I. C. G. et al. **Ecologia e manejo de buritizais amazônicos.** Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2015.

VINOD, A. et al. Renewable and sustainable biobased materials: An assessment on biofibers, biofilms, biopolymers and biocomposites. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 258, 120978, 2020.

WEARN, S. C. et al. Nanoparticle-modified natural fibers: improving interface and durability.

**Composites Science and Technology**, [S. l.], v. 194, p. 108–129, 2020.

ZAPATA, J. C.; ARCILA, J. A. **Poliésteres insaturados**: propiedades e aplicações. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2012.